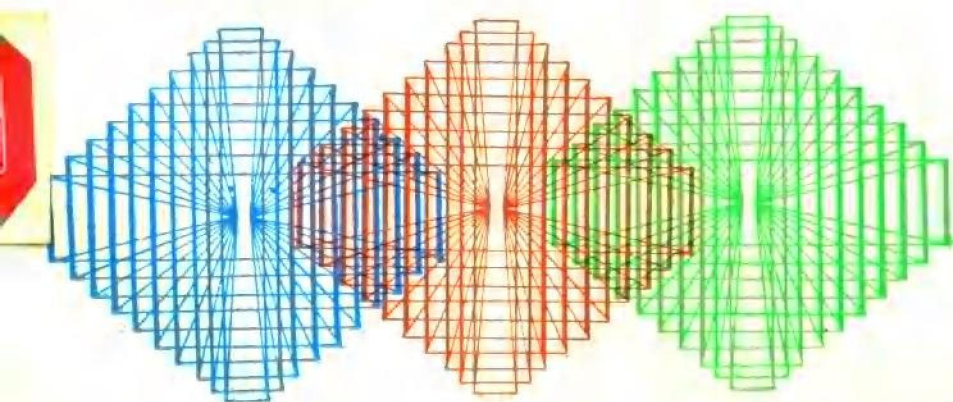


王 雨 田 主 编

KONGZHI LUN 控制论
XINXI LUN 信息论
XITONG KEXUE 系统科学
YU 与
ZHEXUE 哲学

(第二版)



王 雨 田 主 编

KONGZHI LUN 控制论
XINXI LUN 信息论
XITONG KEXUE 系统科学
YU 与
ZHEXUE 哲学

(第二版)

中国人民大学出版社

控制论、信息论、系统科学与哲学
(第二版)

王雨田 主编

中国人民大学出版社出版发行
(北京西郊海淀路39号)

中国人民大学出版社印刷厂印刷
(北京鼓楼西大石桥胡同61号)

新华书店经销

开本：850×1168毫米32开 印张：16.5 插页2

1988年3月第2版 1988年3月第1次印刷

字数：406 000 册数：1 - 20 000

ISBN 7 - 300 - 00236 - 6

B·28 定价：4.85元

GF51/10

说 明

为了加强对控制论、信息论、系统科学的基本理论的学习并对有关的哲学、方法论问题进行探讨，我们曾经组织过业余的学习讨论。我们深切感到处在现在这样一个时代，为了加速我国的四个现代化建设，新兴的科学技术无论是在理论上还是在实践上都是具有重大而深远意义的。因此，我们很想与对此感兴趣的同志们相互学习与交流，决定写出这样一本书。经过我们共同努力，先后写出过两稿。最后，由王雨田同志统编、修改或改写并定稿为本书（冀建中同志协助主编做了一些工作，并在后期参加了部分定稿工作）。

参加本书编写工作的同志和他们的基本分工为：

控制论部分：王雨田（中国社会科学院哲学研究所）；冀建中（北京大学）李力伟（清华大学）张立平（北京市社会科学规划办公室）陈刚（哈尔滨师范大学）

信息论部分：周桂茹（北京邮电学院）王雨田

系统科学部分：王雨田 王光伟（中央党校）轩敏利（新疆自治区党委宣传部）李力伟 冀建中

在编写过程中，吴允曾教授对有的章节提过宝贵意见，冯国瑞同志做过一些文字加工，黄小寒、王蓉蓉同志提供过个别资料。方华教授、王箴禹同志为本书的编辑和出版做过很多工作。在此对他们深致谢意。

由于本书所涉及的学科范围过宽，我们的水平有限，因之缺点甚至错误难免。加之作者较多，统编有一定困难，难免有粗略

不当和不平衡之处。我们本着向同志们学习的热望，恳请予以批评指正。

编写者

一九八四年五月

第二版说明

限于时间和条件，本版未能对全书作全面的修改，仅将上一版中印刷的错处尽量加以改正。同时，对内容上欠妥之处作了个别的修正与补充。考虑到当代科学的发展，特将协同学与超循环理论部分作了改写（协同学部分由北京市委党校傅华同志、超循环理论部分由北京化工学院黄小寒同志编写，特向她们致谢）。

编写本书时参考或引用过一些专著或论文，未能一一列出，谨致谢意。

本版虽尽力作了修正，但缺点、错误仍不可免，欢迎读者批评指正，以便于再版时修订。

编写者

1987年10月

目 录

绪 论	(1)
-----------	-------

第一篇 控制论的基本概念与 哲学、方法论问题

第一章 控制论的形成与产生	(5)
第一节 控制论以前的自动装置与理论	(5)
第二节 控制论产生的社会历史背景	(13)
第三节 控制论产生的理论前提与技术条件	(17)
第四节 哲学与方法论的研究对控制论形成 的作用	(30)
第五节 控制论的产生与进展	(31)
第二章 控制论的基本理论	(36)
第一节 控制、行为与目的	(36)
第二节 控制系统与控制论系统	(47)
第三节 控制与信息	(60)
第四节 控制论机器与自动机	(66)
第三章 控制论的一些主要方法	(88)
第一节 功能模拟方法	(89)
第二节 黑箱—灰箱—白箱方法	(92)
第三节 形式化、数量化、最优化的方法	(102)

第四章	控制论的应用与主要分支·····	(103)
第一节	工程控制论·····	(104)
第二节	生物控制论·····	(163)
第三节	社会、经济控制论·····	(182)
第四节	智能控制与人工智能·····	(210)

第五章	控制论的哲学与方法论问题·····	(229)
第一节	有关问题的历史回顾·····	(229)
第二节	控制论的研究对象与特点·····	(232)
第三节	人工智能中的哲学问题·····	(240)
第四节	控制论与社会·····	(256)
第五节	控制论与马克思主义哲学·····	(262)
第六节	控制论的方法论问题·····	(271)

第二篇 信息论、信息科学的基本 概念与哲学、方法论问题

第六章	信息论的形成与产生·····	(276)
第七章	信息论的基本内容和提出的问题·····	(283)
第一节	信息概念与通信系统模型·····	(283)
第二节	信息量与负熵·····	(288)
第三节	信息论的基本问题与研究进展·····	(298)
第八章	从信息论到信息科学·····	(304)
第一节	信息科学的基本内容·····	(305)
第二节	信息科学的研究进展·····	(308)
第九章	信息论与信息科学的应用·····	(318)
第一节	信息论与控制论·····	(318)

第二节	信息论与分子生物学、医学·····	(321)
第三节	信息论与管理科学·····	(326)
第四节	信息科学与现代社会·····	(331)

第十章 信息论与信息科学中的哲学与方

法论问题	(335)
第一节 信息概念与哲学范畴	(335)
第二节 信息的实质	(345)
第三节 信息与能量、物质的关系	(359)
第四节 信息与反映、意识、认识论	(365)
第五节 信息方法	(376)
第六节 信息论、信息科学中的方法论问题	(381)

第三篇 系统科学的基本概念 与哲学、方法论问题

第十一章 系统工程和运筹学的形成与产生·····(391)

第十二章 系统工程的基本概念与方法·····(400)

第一节	系统概念及其特点·····	(400)
第二节	系统工程的基本概念·····	(403)
第三节	系统工程方法·····	(405)

第十三章 运筹学的主要分支与方法·····(412)

第一节	运筹学方法的特点·····	(412)
第二节	运筹学研究的主要问题与分支·····	(413)

第十四章 一般系统论的形成与基本概念·····(422)

第一节	一般系统论的形成·····	(422)
第二节	一般系统论的基本概念·····	(423)

第十五章	系统科学与系统方法	(435)
第一节	系统科学的涵义	(435)
第二节	热力学、信息熵与生命系统的进化	(439)
第三节	耗散结构理论、协同学与自组织系统理论	(453)
第四节	生物控制论、系统科学与还原论问题	(478)
第十六章	系统研究、系统科学的哲学与方法论问题	(488)
第一节	系统思想的发展	(488)
第二节	系统科学中的哲学与方法论问题	(500)
结束语		(517)

绪 论

本世纪的40至50年代，主要在第二次世界大战及其前后的期间，出现了一系列崭新的科学技术和有关的理论。这就是：电子计算机、控制论、信息论、系统工程、运筹学与一般系统论等等。其中除一般系统论来自理论生物学与哲学而偏重于理论方面以外，其余的都来自技术科学。它们彼此之间有着密切的内在联系，有着一些共同的特点。就其形成与产生来说，它们有着共同的历史背景和条件。就其以后的进展来说，它们各自向纵深发展而又相互渗透，在这个过程中形成了一系列新的横断学科，对现代科学技术与社会的发展产生了重大而深远的影响。这些已经是公认的事实。

就我国的情况来说，在50年代前后，这些学科已陆续被介绍过来，也开展了一些初步的研究工作。这主要与我国在60年代前后研制原子弹、人造地球卫星与导弹等国防科研项目有关。党的十一届三中全会以来，随着我国社会主义现代化建设新局面的开创和发展，这类学科及其有关理论的研究日益受到重视，并得到前所未有的重大发展。

上述科学技术和有关的理论，主要是在技术科学领域中形成和发展起来的。从表面上看，它们与一些基础学科，特别是与本世纪以来的一些重大自然科学成果如相对论、量子力学等似乎看不出有什么联系，也不是由这类基础学科直接派生出来的。其实，它们对这类技术科学的理论研究却是十分重要的。首先，技术科学与基础科学是紧密联系着的。这些技术科学的形成是以基础科

学的成果为理论前提的，其本身又具有与基础学科，特别是数学、物理学、生物学等密切相关的性质与特点。从这些技术科学的产生到现在，已逐步发展成为信息科学、系统科学与控制科学，这些新的科学本身就属于或具有基础学科的性质。其次，对这些技术科学和基础科学的理论研究还有另一个十分重要的方面，这就是必须进行有关的哲学与方法论问题的研究。当然，对任何科学技术都可以而且应该进行哲学与方法论的探讨。但我们在这里所提到的这些科学技术，由于它具有一些崭新的性质与特点，在它们形成与创建的过程中，就不能不涉及到对一些有关的哲学与方法论问题的探讨。在它们形成之后，就其内容与体系来说，又涉及到一系列的哲学与方法论问题。有的学科，如一般系统论，其本身甚至就已经具备了某些哲学的特性，表现了科学与哲学、方法论相互渗透这一值得注意的新趋势。

因此，这些本来是属于技术科学领域的科学技术，在国内外都日益受到科技工作者、哲学工作者、自然辩证法和科学哲学工作者以及其他人士的关注与重视，这决不是偶然的。

近年来，哲学界的同志们越来越感到需要了解现代科学技术的一些重大成果，以便探讨有关的哲学问题，进一步丰富和发展马克思主义哲学的某些基本原理。同时，科学技术界的同志们也感到在科学技术相互渗透的新形势下，必须扩大知识面，了解有关新兴学科的新进展，重视哲学与方法论在科学技术发展中的作用，以便更好地发挥专业特长，为四个现代化服务。在这种情况下，本书所涉及的内容无疑是为这些同志们所共同关心的，因为当前科学技术与社会生活的发展，是与信息、控制、系统这三个基本的概念及其学科的发展分不开的。本书试图大体按照历史发展的过程，将电子计算机、控制论、信息论、系统工程、运筹学、一般系统论等这一组有着内在联系的科学群，分别将其基本思想与基本概念作比较系统的论述，以便对这些学科本身有一个比较

确切而实际的了解，然后再就有关的哲学与方法论问题加以概略的评述。这两部分是相关的，后者是前者的必然引伸，弄清前者有助于了解后者。

上述这些学科与数学工具的使用是分不开的。为了使更多的读者能够阅读本书，我们采用兼顾的办法，对于每一学科的基本思想与基本概念，尽量做到直观引入，先用初等数学加以说明，然后给出较严格一些的数学描述，所用到的数学工具也只限于初等微积分、线性代数、初等概率论、简单的集合概念和数理逻辑中命题演算与谓词演算的基本知识，总的来说，没有超出工科大学生的数学水平。这是考虑到，即使是现在的哲学专业大学生也是不难达到这种水平的。对于一般的科技工作者来说，更不会有困难。

第一篇 控制论的基本概念与 哲学、方法论问题

第一章 控制论的形成与产生

第一节 控制论以前的自动装置与理论

1948年，美国数学家诺伯特·维纳（Norbert Wiener）发表了专著《控制论（或关于在动物和机器中控制和通讯的科学）》（《Cybernetics Or Control and Communication in the Animal and the Machine》）。这是控制论的奠基性著作，它标志着这一新兴学科的诞生。

在现代科学分类的体系中，它是一门技术科学。它的形成和产生，是与现代社会生产的高度自动化水平密切相关的。正如恩格斯在1894年1月25日致符·博尔吉乌斯的信中所指出的：“社会一旦有技术上的需要，则这种需要就会比十所大学更能把科学推向前进。”^①一方面，现代社会的生产和管理对于高度自动化水平的需要决定了控制论在本世纪的40到50年代必然要形成和诞生；另一方面，它的形成和产生又对社会生产和社会发展产生了深远的影响，具有重大的理论意义和实践意义。

^① 《马克思恩格斯选集》第4卷，第505页。

什么是自动化？一般是指生产、管理和科研过程中，在没有人的直接干预下，通过一定的技术装置，按照预定的规则，就能达到预定的目标，从而提高效率的过程。与此相应，人的体力劳动或脑力劳动得到减轻。其中有关的技术装置，就是自动控制装置，简称为自动机器。

随着人类生产劳动的发展，生产工具的不断改进，到了一定的时期，具备了一定的条件，人们就会自觉或不自觉地把生产工具的改进与减轻人的体力劳动、甚至脑力劳动的要求联系起来，作为提高劳动生产率的一个重要因素。这涉及到人们的社会生产方面，也涉及到人们的社会生活方面。在这个意义上，人类对于自动化的要求可以追溯到很早的时期。

从现有的一些史料来看，我们的祖先早就发明和使用过一些简陋的自动装置。例如，很早以前，我国有人发明了能自动计时的“铜壶滴漏”装置。秦汉时期，我国已经有了用铜或铁制造的齿轮，所以在2100年前，西汉时期就有了指南车^①、记里鼓车^②。用现在的自动控制理论来分析，前者对水位的调节是一种参数恒定系统，后者是一种按扰动调节原理而构成的开环自动调节系统。东汉时期的著名科学家张衡（公元78—139年）发明了采用齿轮系统的天文仪器和自动播出每月日数的计时器。公元117年，他发明了“浑天仪”，这是一种模拟天体运动的自动装置。北宋哲宗元祐初年（公元1086—1089年），苏颂、韩公廉发明了水运仪象台，这是一种闭环自动调节系统。距今600多年前，詹希元发明了与近代钟表相似的计时器。在西方，公元前3世纪，希腊人

① 参看刘仙洲：《中国机械工程发明史》第一编，科学出版社1962年版。

② 参看万百五：《我国古代自动装置的原理分析及其成就探讨》，《自动化学报》1963年第2期。

发明了与我国的“铜壶滴漏”属于一类的水钟。到公元9世纪，这种水钟又为阿拉伯人所改进，使之成为一种反馈装置。见图1·1。公元前2世纪，古埃及亚历山大城的赫伦，发明过用于祭

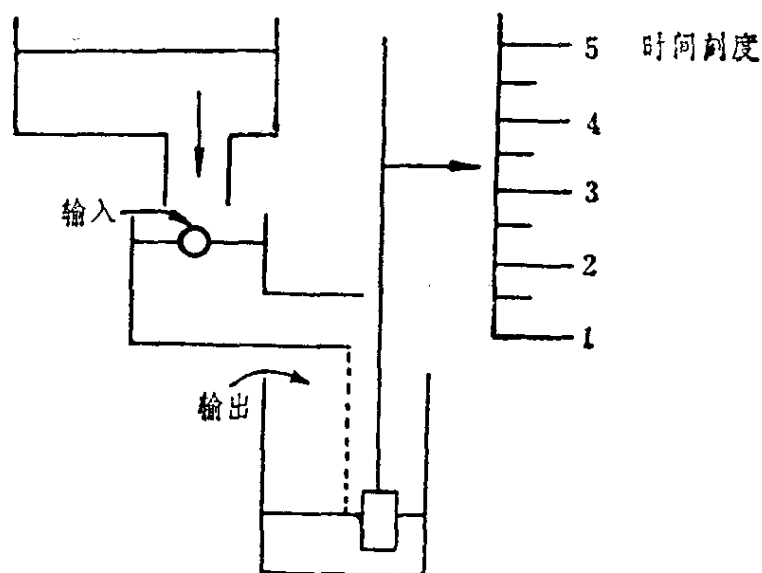


图1·1 水 钟

酒的自动装置。他还描述过古希腊的戏院中有过一种机械的自动装置，不但能设置和改变舞台布景，开关戏院的门户，还能模仿人的某些动作。此外，古罗马人的家庭中安装过一种水管系统，与我们现在安装在卫生间内的水箱的水位控制系统属于同一种类型，它们都是按偏差进行补偿的反馈控制系统。

以上这些古代的例子，都是与社会生产、生活和科研活动有关的。除此以外，还能找到一些与人们的文娱生活以及与王公贵族们玩赏有关的例子。这一方面反映了人们对某些技术装置具有自动功能的好奇，另一方面反映了一些能工巧匠的技艺。据说，文艺复兴时期的达·芬奇为路易十二制造过供其玩赏的机器狮。18世纪时，J·沃康松制造过能演奏20个左右简单曲子的吹长笛“人”，还制造过机器鸭。稍后，瑞士的钟表匠德罗父子制造过

模仿人的抄写者与“女音乐家”^①。我们不妨把这些看作是一种最简陋的“机器人”。

上述的自动装置都是些比较简陋的设备。真正对于现代的控制论和控制论机器的产生有前驱作用的理论与技术装置，严格说来，是随着资本主义社会的形成和发展而出现的。根据马克思在《资本论》中对资本主义生产方式形成的历史分析，资本主义经历了简单协作、工场手工业和机器大生产三个时期。在这个过程中，特别是在第三个时期中，随着生产工具的改进与变革，自动装置也取得了相应的进展。在封建社会后期与资本主义的早期，最有代表性的自动装置就是钟表和磨。马克思在1863年1月28日给恩格斯的信中写道：“从16世纪到18世纪中叶，即工场手工业从手工业一直发展到真正的大工业的时期，在工场手工业内部为机器工业作好准备的有两种物质基础，即钟表和磨。……钟表是第一个应用于实际目的的自动机器”。^②它对人们的生产管理和生活都有重要的作用。就磨来说，无论在我国或在国外，从封建社会到资本主义社会初期，已经由人力手推磨改进为风力或水力磨。动力的改进，带来了如何控制进磨口的粮食流量以保持磨出的面的质量的问题。这样，早在16世纪甚至更早一些的时候就发明了装在磨上的震动器（见图1·2）。当时的一位军事工程师拉梅里（Ramelly）在1588年出版的著作中曾记载了这种使磨

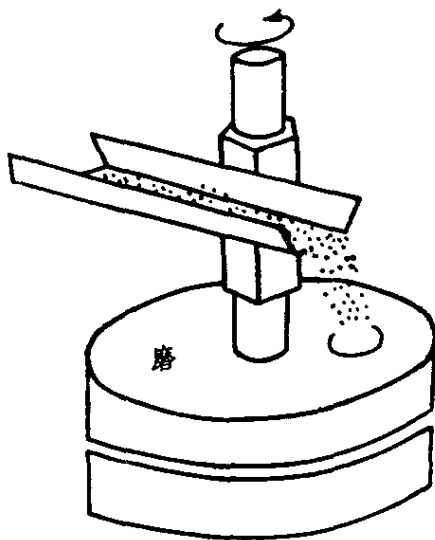


图1·2 震动器

① 参看茹科夫：《控制论的哲学原理》，上海译文出版社版，第24—25页。

② 《马克思恩格斯书信选集》，人民出版社版，第145页。

盘转速维持恒定的装置^①。当磨盘转快时，其接合稜也转得快，送进磨口的谷粒增多，负荷、摩擦力加大，磨的转速减慢；当谷粒硬度较大时，磨擦力大，磨的转速也减慢。当磨的转速减慢，送进磨口的谷粒减少，磨擦力减弱，磨的转速又会加快。这种循环往复的自动调节，使磨的转速比较稳定从而使产品质量保持一定水平。

在近代科学技术史上，具有重大意义的一种比较典型的自动装置，是瓦特（James Watt）在1787年发明的安装在蒸气机上的离心式调节器。在这之前，已经有人发明了用蒸气推动活塞的机器，但是蒸气的进气与排气都是手工操纵和控制的，其劳动强度大，效率低，实用价值小。瓦特的这一发明解决了这个问题，使蒸气机成为一种有效的动力机器，它的推广和使用对于产业革命起了重大的促进作用。这种机器利用的是离心力作用原理。在图1.3所示的蒸气机轴上，当负荷增加时，转速减慢，离心式机构的角速度减小，摆锤下降，套筒M下降而通过调节机构抬高供汽管上的闸板，进气增加，使蒸气机转速加快。通过加大或减少进入

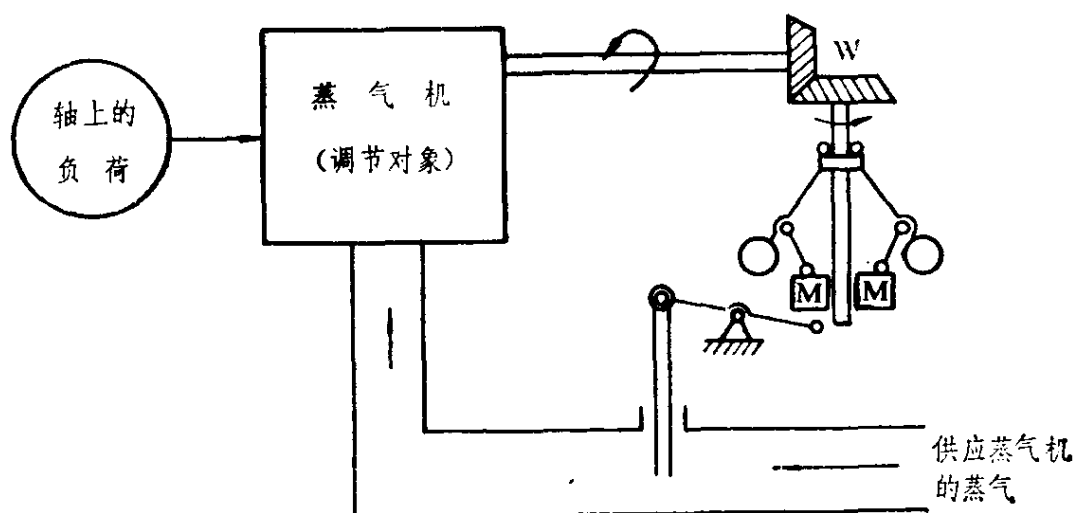


图1·3 蒸气机轴转速的离心式调节器

① 参看Ramelly: 《Diverse artificial machine》，1588年。

机器的能量这种办法，达到自动调节蒸气机转速的目的。

上述这两类自动装置，在理论上都属于按偏差进行补偿的系统。这类系统的一个主要特点是在该系统中至少要有一个将输出量加以回输的闭合环路。这是一种具有反馈（Feedback）的系统，是一种闭环自动系统。

开环的自动系统* 是不具有反馈的，它往往带有一种装置，使得输入量能按负荷的变化而成比例的改变以趋于目标值。这是一种按扰动（或干扰）进行调节的系统。这类系统的装置简单，成本低，出现的时间比具有反馈的闭环系统要早。但是它的抗干扰的性能差，不够稳定，又是非线性的，还有一些其他的缺点，所以反而不如具有反馈的闭环系统显得实用。

在上述实践的基础上，J.C.麦克斯威尔（J.C.Maxwell）于1868年发表了一篇关于调速器的论文^①，对反馈作了理论论述，并从数学上进行了探讨。这是控制论学说史上具有重要意义的一篇文献，它标志着反馈控制系统的制造与研究已成为近代科学技术史上一个重大课题。维纳对这篇论文是十分重视的，他选用“控制论”这个名称来命名这门学科，是与纪念这篇论文有关的。从字源上说，cybernetics（控制论）这个字是从希腊文 κυβερνητης（掌舵人的意思）演变来的。而拉丁文的调速器（governor）一字也是从 κυβερνητης 这个字的讹误中引申出来的。本来，在古希腊文献中，如柏拉图的《高尔吉亚》篇（《Gorgias》）曾使用过这个词，通常是指驾船术、操舵术或掌舵人，有时还用来表示对人管理的艺术。1834年，法国物理学家安培研究科学分类时，据此将管理国家的科学称为控制论并把它列入政治

• 关于反馈、闭环、开环等概念，将在后面论及。

① J.C.Maxwell, Proc. Roy. Soc (London), 16, 270—283 (1868)。

科学类。所以，19世纪出版的一些著名词典中，曾在上述含义上编入这个词。维纳选用这个词，在当时主要不是在对人或国家管理的意义上来使用的，而是从反馈这个含义上来使用的。因为上面提到的麦克斯威尔的论文是第一篇讨论反馈机构的重要论文，而船舶的操舵机就是较早使用反馈机构的一种自动装置。由此也可看出，控制论属于技术科学之列，它是在伺服机构的理论基础上形成和发展起来的。

在控制论出现之前，反馈原理已经成为当时伺服机构理论中的一条重要原理，并得到了广泛的应用。例如，1919年，N·迈诺斯基利用反馈来控制军舰的横摇，提高了火炮的准确度。20年代，反馈原理已经广泛运用到长途电话的电子放大器中，使得每个中继放大器的增益不因元件老化与电压变化而不稳定，以便使具有成百个放大器的整个系统有不变的特性。30年代，反馈原理又推广应用到化工过程与炼油过程中，以保证产品特性与设备性能符合规格。在30年代后期，苏联由于社会主义工业化的需要，成立了自动与远动协会。不久，美国的麻省理工学院成立了伺服机构实验室。1945年，美国的波德(H.W.Bode)写了《网络分析和反馈放大器设计》一书，一般认为这部著作奠定了控制论之前自动控制理论的基础，从此开始形成了这一学科。1946年，在麦考尔所写的《伺服机构的基本理论》一书中，对反馈的正反两方面作用进行了详细的讨论，这时，人们已经从量的方面对反馈有了很透彻的了解。1947年，美国出版了第一本自动控制理论的教材，书名为《伺服机构原理》。1948年，美国麻省理工学院出版了另一本教材，即《伺服机构理论》，建立了现在已被广泛使用的频率法。同年，布朗(G.S.Brown)与坎贝尔(D.P.Campbell)也出版了《伺服机构原理》一书。

由此可见，在控制论出现之前，在本世纪30到40年代期间，已经逐步形成了自动控制理论这一技术学科，当时一般称为伺服

机构理论，控制论是在这一学科的基础上形成和发展起来的。控制论的一个重要分支工程控制论，早期阶段是经典控制理论，它的一些内容在伺服机构理论中已经初步具备，如反馈原理、传递函数概念与频率法等等。从这里，我们看到了控制论与伺服机构理论的继承关系。

什么是伺服机构(servomechanism)? 这里我们引述一种比较典型的看法：“伺服机构是对机械运动进行自动控制的反馈控制系统，伺服机构（又称伺服系统）这个名称常和反馈控制系统互换使用，但严格地说，它只是指被控量（或系统输出量）是机械位移或位移的导数（如速度、加速度等）的反馈控制系统。……伺服机构应该达到下面一个或几个目的：（1）在没有人参预下对连杆或转轴运动的准确控制（自动控制）。（2）在机械负载改变、环境条件改变、电源波动、元件老化或特性改变等因素影响下，能保证被调量的准确性（自镇定）。（3）以小功率指令信号去控制大功率负载（功率放大）。（4）在没有机械连接的情况下，由输入轴去遥控输出轴（远程控制、轴同步传动）。”^①由此，本书引用的上述一些例子，只要是依据反馈原理的，一般都属于伺服系统。它主要是指一类比较简单的，使用机械元件、电机元件而构成的反馈控制系统。这与当时的技术水平是相联系的。后来的控制论机器（在广泛的意义上与电子计算机相关）大量使用电子元件，与伺服系统相比，使用的材料或复杂的程度是不同的，所依据的原理上也有重大的区别。

与此相应，在伺服机构理论的应用方面，主要是在30到40年代期间，逐步出现了半自动化的流水作业线与车间，使得社会性的机器生产开始出现了自动化的萌芽与趋势，这是对现代社会的发展具有重大意义的事件。比较典型的例子，是福特汽车公司的

① 《科学技术百科全书》第24卷，科学出版社版，第435—436页。

哈德(D.S. Harder)在1946年研制成功了将发动机气缸送进传动机,然后又从中移出来的自动装置,到1947年建成了第一个自动化部门。1948年10月21日出版的《美国机械师》杂志,第一次用“自动化”这个术语来介绍福特公司自动化研究组的成果。当时,把自动化定义为:“用机械装置去操纵工件的进出,在各种操作之间转送零件,消除废料,用生产设备按照一定的时序去完成这些任务,使流水线能部分或全部地处在集中控制站的按钮控制之下的一种技术。”^①它主要是指一种按固定程序通过仪表而进行自动控制的技术,也可称为程序控制。这类控制,在自动化技术的水平上虽然较前大大前进了一步,但比较呆板,缺乏灵活性,没有与条件或环境的变化相适应的能力。由此可以说,这种自动化的水平是不高的。

第二节 控制论产生的社会历史背景

建立在社会性大机器生产基础上的现代社会生产必然要向自动化发展,并且必然要向高度的自动化水平发展。

首先,这是由现代社会的高度生产力水平所决定的。资本主义的机器生产带来了高度的生产力水平,大大加强了向自然界的深度与广度进军的能力,只有高度的自动化水平才能与之相适应。以原子能的利用为例,1909年爱因斯坦发现了质能等效性原理($E = mc^2$),1942年著名物理学家费米在芝加哥大学建成了第一个原子反应堆,到1945年就第一次实现了裂变原子弹的爆炸,1952年又实现了第一次聚变氢弹爆炸。显然,在40到50年代期间所进行的种种有关核能的研究与实验以及有关的生产与应用

^① 《科学技术百科全书》第24卷,科学出版社版,第577页。

等等，必然要遇到人所难以亲临其境的困难，所以当时就有了模拟人手操作的机械手，人是隔着屏蔽幕利用这种机械手进行操作的。我们知道，人要进行操作，不仅要通过感觉、知觉的作用，还要通过思维进行判断与推理，以便根据所处理的核物质的具体情况进行相应的操作。并且，在某些情况下，人隔着屏蔽幕来操作都是不可行的，而必须远距离操作，那么，只有这种机械手就显得不够用了，必须要有能够在一定程度上代替人的感觉、知觉与思维过程的自动机器，也就是要能模拟人的智能的机器，才能适用，原有的那种简单的伺服机器，那些按固定程序控制的机器显然是不够用的。维纳曾说过：“为了掌握极端危险的原子弹，可能也需要把这些机器推向更高的发展阶段。”^①

其次，还要看到经济的原因。机器生产自动化的出现不仅需要生产和技术的条件，还需要相应的资金条件。在资本主义条件下，正是由于资本的集中，帝国主义的出现，才使得一些垄断企业或大企业有能力进行设备更新，采用自动化。所以自动化首先从福特公司这类垄断企业开始并不是偶然的。并且，象这类大企业，一旦采用自动化技术，就会大量增加利润，而利润又是刺激资本主义生产的动力。虽然半自动化的水平已经使大资本家获得了大量的超额利润，但是按固定程序进行的半自动化生产，无法根据不断变化着的供销情况来改进产品型号，这对竞争是很不利的。因此，从这方面说，也要求向更高级的自动化水平发展。

我们仅仅根据上述两方面的理由就可看出，资本主义的机器生产不仅必然要向自动化发展，而且必然要向高水平的自动化发展。这是一种客观的必然趋势。

所谓高水平的自动化，主要标志是要使智能或某些智能自动化，以便使这类高级的自动机器，不仅能减轻人的体力劳动，而

① 维纳：《控制论》第二版，科学出版社1985年版，第43页。

且还能减轻人的脑力劳动。就是说，这类能够进行智能模拟的自动机器主要不是作为人手的延长，而是作为人脑的延长。维纳在《人有人的用处——控制论与社会》一书中就曾明确地表示过：现代社会生产的自动化是必须将反馈控制与电子计算机的应用结合起来的。事实上，现在对于自动化的理解，一般认为它应具有两个主要的技术分支，一个是自动控制技术，另一个是以电子计算机为中心的信息处理技术，而这二者既相区别又相联系。下图就表示了它们之间的相互关系^①：

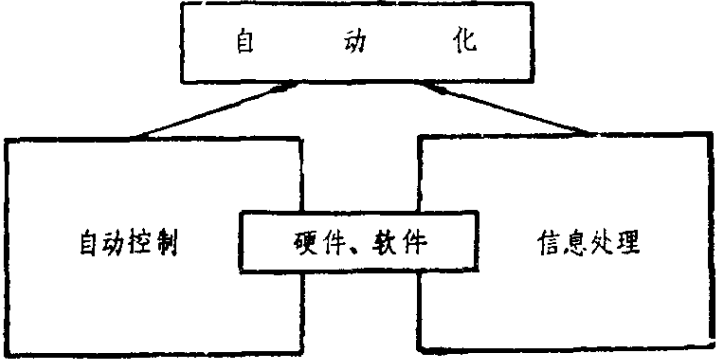


图1·4 自动控制、信息处理与自动化的相互关系

从这种内在的联系可以看出，控制论不仅区别于伺服机构理论，而且也与现今的自动控制理论相区别，其区别的主要点就在于它使人类体力劳动的自动化进展为人类智能的自动化，也只有这样，才能达到高度的自动化水平。

以上说明了现代社会生产和社会的发展必然要求向高度的自动化水平发展。由于原有的伺服机构理论只能解决某些体力劳动的自动化，而不能解决人类某些智能的自动化问题，因此必然要出现某些新兴的学科来解决这个时代所提出的任务，控制论及与其有关的某些科学技术，如电子计算机、信息论等，就是为此应

^① 参看稻田春政：《自动控制基础〔I〕》，新时代出版社1982年版，第9页。

运而生的。

导致控制论产生的直接原因是第二次世界大战期间对于自动高射大炮的研制。在战争初期，德国法西斯在进行了侵略战争的长期准备之后采用了闪电战术，他们占有很强的空军优势，无论在技术装备与飞行员训练上都是如此。德国飞机的高速度、不断变化的战术和驾驶技巧使得老式高射炮的观测、计算和射击系统失效。这是因为德国飞机的速度很快，飞行员又可采取飞曲线、翻筋斗等狡猾的战术动作，因此，发射高射炮弹时，必须预测飞机将要达到的位置才能命中。为此，就要有相应的高速度计算，以便做出判断，并迅速地对炮位、方向以及角度加以调节与操纵。显然，这些要求是当时已有的自动装置和伺服机构理论所无法实现的。这就必须另谋出路，研制自动高射火炮。在第一次世界大战期间，维纳在阿伯丁射击场参加过编制高射炮射击表的工作，当时他已认识到高速计算机的必要性。到第二次大战期间，1940年前后，美国政府专门委托维纳和工程师别格罗（J.H. Bigelow）等人研究解决这个问题。从理论的探讨来说，这里包括两个问题，一个是高速计算问题，一个是在复杂情况下的预测问题。就前者说，维纳在1940年已经开始研究过如何发展计算技术以解偏微分方程的问题，在研制新型的电子计算机方面，他本人也提出过一些重大的建议。事实上，从这以后不久，专用的与通用的电子计算机陆续出现，为这个问题的解决提供了必要的技术条件。对于后一个问题，他指出，尽管飞行员所能采取的战术技巧可以十分复杂，但他却没有任意操纵飞机的完全自由，他必然要受到一定条件的约束，只要引入相应的方法与数学工具，特别是统计数学工具，对飞行曲线的预测问题是可以得到某种解决的。这两个问题本来都属于人的智能范围，就是说只有研制出一种新型的自动装置，使之能代替人的这类智能，这两个问题才能获得解决。维纳后来回忆实现这一任务的过程时指出，为了解决

这个技术问题，不能不研究相关的生物科学，如神经解剖学、神经生理学，以及心理学和语言学等等。这实质上就是要在理论上将技术科学与生物科学沟通起来，使二者相互渗透，在技术上研制出能够进行智能模拟的自动机器。

这在科学史、技术史与哲学史上都是具有重大意义的、前所未遇的课题。社会实践提出了这个课题，它的解决也必须依赖社会实践提供的物质条件和物质手段，以及从实践中总结出的科学理论。

第三节 控制论产生的理论 前提与技术条件

现在我们就来分析一下，为了解决上述任务，当时所具备的理论前提与技术条件是什么。

就生物科学来说，一个关键性的问题是人的感觉、知觉与思维活动，或简言之，人的心理活动的生理机制是什么。当时，人们对这些方面的认识达到了什么水平呢？

就当时的神经生理学与心理学来看，主要是用反射概念来解释人的心理活动的生理机制的。大家知道，反射概念首先是由笛卡儿提出来的。从18世纪一直到19世纪末、20世纪初，这个概念在生理学、神经生理学中一直作为一个基本概念而得到广泛的应用。如果我们把19世纪末到20世纪前期的神经生理学称为经典生理学的话，那么其中主要的是谢灵顿学派和巴甫洛夫学派。谢灵顿（G.S.Sherrington）运用测定肌肉张力的定量方法研究了中枢神经系统的低级部位——脊髓的神经活动，认为这是一种反射活动。1897年，他明确指出，神经元之间的机能联系是通过突触实现的。后来，他又以实验证实了存在着不同性质的突触。例如，在

三叉神经中，脑核的传入神经元在三叉神经运动核上有兴奋性突触，与此同时，在舌下神经核上却有抑制性突触。因此，突触在机能上又可分为两种，即兴奋性突触和抑制性突触。这样，在了解了这种结构的基础上，又进一步形成了神经生理学中最基本的理论——兴奋与抑制的理论。这种理论认为，兴奋和抑制是两个彼此独立而又相互联系、相互制约的神经过程。由于这两种过程的相互作用，才使得神经系统作为一个整体对环境起着协调和调节的作用，表现为相应的反射活动。于是，谢灵顿就以兴奋和抑制的结构与机能说明了反射机制。他认为，在同一神经中枢中，兴奋与抑制二者中哪一个占主导地位，这一中枢就处于什么状态，不同中枢之间的联系则决定了对所接受的刺激表现出什么样的反射活动类型。这样，他就以反射概念解释了中枢神经系统的低级部位——脊髓的神经活动机制。但是，它反对把反射概念运用于中枢神经系统的高级部位。

1862年，俄国生理学家谢切诺夫发现刺激青蛙的丘脑能抑制屈肌反射以及脊髓中的其他反射这类中枢抑制现象，其后发表了《大脑反射》一书。他不再把反射仅仅理解为个别器官对外界特定刺激的严格应答，而开始理解为动物行为的整体性动作，包括复杂的心理现象在内。这样，他便主张把反射概念应用于脑的高级部位——大脑半球。在他看来，不仅人的非随意活动是反射，而且人的随意活动也是一种反射，不过是通过大脑皮层反射的有意识的活动。

巴甫洛夫继承了谢切诺夫的这一基本观点，他用测定唾液腺心理性分泌的定量方法，研究中枢神经系统高级部位的反射活动。他把反射区分为条件反射与无条件反射。1913年，他明确指出，条件反射实质上是动物行为的高级神经活动。在此基础上，巴甫洛夫建立了他的高级神经活动学说。在巴甫洛夫看来，无条件反射是动物生来就具有的、带有本能性质的反射；条件反射则

是动物在后天的生活过程中为了适应不断变化的环境而形成的反射，它是与学习有关的，是由于在大脑皮层的兴奋灶之间建立了暂时联系才出现的。他还指出，反射活动都要通过反射弧这种解剖结构来实现。反射弧是由感受器、输入神经元、中间神经元、输出神经元和效应器五个环节构成的，如果其中的一个环节受损伤，就要影响到反射的机能，甚至完全不能实现反射活动。

这样，由笛卡儿、谢灵顿、谢切诺夫、巴甫洛夫逐步明确和完善起来的反射概念，尤其是巴甫洛夫的高级神经活动学说，在当时为控制论提供了描述人类某些智能生理机制的一种理论前提。所以，维纳在其著作中经常提到这些重大的神经生理学成果。法国神经学家P.柯撒（Paul Cossa）曾说过：“控制论运动是与一个古老的方向有关的，这个方向即使不是从拉梅特里开始的，也是从笛卡儿开始的，那就是试图把数学、物理学所使用的方法和表示用于研究人的行为。”^①

与此相关，为了从技术上实现某些智能的模拟，还涉及到经典神经生理学中的“全或无”（“all or none”）法则。早在1867年，意大利生物学家福塔那（Fontana）首先发现了心肌的“全或无”现象，但没引起足够的重视。后来，谢灵顿根据从弱刺激到强刺激传入神经时对其反射活动所表现出的不同张力数值进行分析，指出了中枢神经的每个运动神经元都是遵从“全或无”法则的。以后，谢灵顿学派的亚德里安（Adrian）在1914到1922年期间，总结了前人的成果，再次研究了这一法则。他探讨了单突触反射弧兴奋传递的电生理机制和理化机制与微观结构的关系，明确提出了神经系统的“全或无”法则，认为一切神经反射活动都是遵从这一法则的，它也是谢灵顿的神经兴奋、抑制理论的一个基本前提。所谓“全或无”法则，说得通俗些，就是指

① П.Косса: 《Кебернетика》，1958。

一个神经元在接受外界刺激之后，只要这个刺激量达到了这个神经元作出应答所必需的阈值（即一定的数量限度），那么它就会给出应答，否则，它就完全不作出应答。而且这种应答的信号的大小总是一样的。或者说，神经元的膜电位（即其状态）决定于通过突触所传入的神经脉冲信号的大小及其持续的时间。当膜电位达到一定的阈值（一般为-40毫伏），则膜电位发生跃变，出现动作电位，其波高与波宽是不会改变的；否则就不出现动作电位。神经元的这一特点，对于技术上如何模拟神经系统的结构与功能，是有启发的。

与控制论有关的另一个经典神经生理学的基本概念是稳态（homeostasis）。当动物和人处于一定的环境之中时，如果环境条件的变化导致机体正常状态的严重偏离，那么机体内部就必须有一种能够进行有效调节的机制，使之恢复正常，以维持其与环境的平衡。这种机制就是稳态。早在1879年，著名的法国生理学家伯尔纳（Claude Bernard）在其《普遍生理学教程。动植物共同的生命现象》一书中，就曾明确指出了生物体内的稳态现象。维纳指出，正是伯尔纳真正认识到了稳态机制的重要性。但这个概念的明确提出，则出自美国生理学家坎农（W.B. Cannon）1926年发表的一篇论文，其题目为《正常状态的生理调节：有关生物内稳态的一些试验性假设》。此后，他还多次发表论著，尤其是在1932年发表的《躯体的智慧》对此作过详尽的论述。他认为，稳态是一种可变的、但又经常处于相对稳定的状态。正是这种稳态调节，使得动物机体与环境保持着动态平衡。

根据经典神经生理学的上述基本概念，人们越来越清楚地认识到，人体内存在着自动调节和控制的机制，只要弄清这些机制，就有可能对人体的功能（包括智能）加以模拟。

现在，再来说明控制论得以形成和产生的技术条件。

就当时技术科学所提供的条件来看，主要表现在无线电电子

学和通讯工程技术的进展上，特别是真空管和电子计算机的发明。

维纳在《控制论》一书中指出，人们在电能的研究与使用过程中，到20世纪初，就出现了强电流技术与弱电流技术的分化，相应地有了电力工程和电子工程、通讯工程的分化。而控制论的形成与产生，与弱电流技术的研究进展是密切相关的。电子工程技术，导致电子管、电子计算机的出现；通讯工程技术，导致滤波理论的进展和信息论的出现。

电子计算机之所以能在这个时期研制成功，既与理论的准备有关，也与技术的准备有关。就前者说，它与基础科学，特别是与数理逻辑和数学有关。电子计算机的理论意义在于包括计算、推理在内的思维过程的机械化或自动化。这种愿望是由来已久的。正是基于这样一种愿望与设想，使得莱布尼兹既是数理逻辑的创始人，又在1671年改进了巴斯噶（Blaise Pascal）首先发明的第一台算术计算机。（现在也有人认为第一台计算机是由德国人希克哈德〔Wilhelm Schickharht〕在1624年发明的。）后来，英国数学家乔治·布尔（G.Boole）将代数方法引入逻辑学，运用代数方法处理形式逻辑的某些问题，创立了布尔代数。有趣的是他的这一成果是在1847年发表的论文《逻辑的数学分析：论演绎推理的演算法》及1854年发表的论文《思维规律研究》中提出来的。从后一题目来看，这一成果的意图仍在于实现思维过程的形式化与机械化。而真正从理论上解决这个问题是由数理逻辑与数学来承担的。这就是算法与能行性的概念。递归函数论是最早提出的能行可计算理论。以后又有丘奇（A.Church）和克林尼（S.C.Kleene）提出的 λ -转换演算。到1936年，英国的数理逻辑学家图灵（A.M.Turing）提出了图灵机器的理论，这一理论不仅从数学上严格定义了计算的概念，而且提供了一种理想计算机的模型，从理论上证明了这种机器实现的可能性，为后来电子计算机

的技术实现提供了十分重要的理论基础与前提。根据事后的了解，第一台电子计算机应该是1943年由英国研制成功的破译密码机器。在第二次世界大战期间，德国法西斯的军用密码是由一部名叫“Enigma”（谜）的特殊机器编译出来的，而英国的这部专用电子计算机却能破译这个密码系统。这部计算机的研制与图灵的工作密切相关^①。能行性和算法的概念与理论是计算机科学与技术的最基本的理论基础。尽管40—50年代以来，电子计算机已经经历了真空管、半导体元件、中小规模集成电路、大规模集成电路等四个阶段，而这一基本的基础理论仍没有重大的变化。所以，维纳十分重视数理逻辑对于电子计算机、控制论形成的作用。

就电子计算机出现的技术准备来说，最关键的是真空管（热电子三极管）的发明。从技术史来看，计算机的发展经历了使用机械元件、电机元件和电子元件这三个阶段，其相应的器件则是齿轮、继电器与电子管。1937年，美国贝尔电话实验室的斯蒂比茨（G. Stibitz）设计了使用继电器（这是一种用电流来操作的机械开关装置）的半自动化机器，称为混合计算机，于1940年制成。1941年，德国工程师朱斯（Zuse）制成第一台全部使用继电器的通用自动机电计算机，并且第一次采用了二进制的程序控制，称为Z—3计算机，它对以后电子计算机的研制有很大的影响。1944年，美国IBM公司（国际商业机器公司）根据哈佛大学艾肯（H. Aiken）设计的自动序列控制计算机制成Mark I计算机，这是当时最先进的一部机电计算机。即使如此，这种计算机的运算速度仍然不能达到高度自动化所要求的水平。由于真空管中栅极控制电流开关的速度要比电磁继电器大1万倍左右，所以

^① 参看M.戴维斯：《今日数学》（《什么是计算》），上海科学技术出版社1982年版，第272页。

电子管就被迅速地应用于计算机的研制。

维纳对电子计算机的研制也是很重视的。1940年，他曾向布希（Vannevar Bush）提出过改进计算机的五点建议：（1）在计算机的中心部分，加法和乘法的装置应当是数字式的；（2）开关装置的机件应当由电子管来做；（3）加法和乘法采用二进位制；（4）全部运算程序要在机器上自动进行，从把数据放进机器时起到最后把结果拿出来为止，中间应该没有人的干预，由此所需要的一切逻辑判断都必须由机器自身作出；（5）机器中要包含一种用来存贮数据的装置。维纳的这些建议在当时由于一些条件的限制没被立即采用。但我们可以看到，他不仅注意到电子管和二进制的使用，而且特别重视要电子计算机取代人脑的某些功能，如判断、推理、记忆等，这与控制论的基本思想与目标是一致的。在这个时期，维纳与第一代计算机的研制者如埃克特（J.P.Eckert）、冯·诺意曼（J.Von Neumann）等人经常有学术联系。后来，战争的迫切需要推动了电子计算机的研制工作。在美国，1942年，阿贝丁试炮场在计算火力表时，由于每张表就要计算几百条弹道，所以迫切需要解决高速计算问题。美国宾夕法尼亚大学莫尔学院的莫奇勒（J.W.Mauchly）博士提出研制电子计算机的方案。后来，军方代表戈德斯泰因（H.H.Goldstine）、24岁的总工程师埃克特等人支持并参加了这一工作。1945年底，第一台通用电子计算机“埃尼阿克”（ENIAC）研制成功，1946年正式投入使用，这种机器是用1.8万多个真空管组装起来的，每秒运算5千次，大大提高了运算速度。在这期间的1944年夏天，冯·诺意曼曾参与这个小组的工作。他提出“程序内存”方法和二进位制。所谓程序内存，就是把一些常用的基本操作制成电路，放置在计算机的运算器内，而每一种操作用一个数来代表。程序员用这些数来编制解题程序，然后，把程序与要计算的数据一道存放在计算机的存贮器内。当计算机运行时，它从存贮

器中取出程序中的一条条指令，按这些指令对某数据进行某种运算，计算机从一个程序指令转入到下一个程序指令也是通过一种叫做“条件转移”的程序指令来自动进行的。这样，“程序内存”就使得全部运算成为真正的自动过程，比以前采用的“程序外插”方法大大前进了一步。“程序内存”的采用是计算机史上的一个里程碑，它对控制论任务的实现也有重要意义。1949年5月，这个小组又研制成功世界上第一台“程序内存”型的电子计算机(EDSAC)，在英国剑桥大学投入运转。

除了电子管、电子计算机以外，弱电流技术对控制论产生所起的作用还从通讯工程技术方面表现出来。在通讯理论中很重要的是滤波问题。所谓滤波，就是指一个通讯系统中，要从所接收的信号中尽可能排除干扰，从中分离出所期望的原来的消息，或者说得确切些，就是通过对一系列带有误差的实际测量数据的处理，得出所期望的估计值。滤波是要恢复一个被噪声干扰了的消息流，使之尽可能得到原来的消息，因而也与预测问题密切相关。1941年，苏联数学家哥尔莫戈洛夫(А.Н.Колмогоров)发表了《平稳随机序列的内插法和外推法》的论文。维纳很重视这一成果，并在此基础上研究了通讯理论中的滤波与预测问题。1949年，他发表了《平稳时间序列的外推、内插和平滑及其工程应用》这一著作，提出了构成工程控制论、通讯理论重要组成部分的维纳滤波理论，开拓了线性控制理论的研究。循此继进，维纳探讨了控制理论与通讯理论的内在联系，这种联系非常深刻地统一于信息这一基本概念。通讯工程与电力工程的一个重大区别就在于前者的目的主要不是能量的转换与处理，而是要使信号高频率地传输和准确地再现，这种信号可以是电键的扣击，也可以是电话的传音，以及由这些信号所刻划的消息、情报等等。所以，通讯工程主要是以消息作为基本概念的。而控制过程又是离不开消息的传输与处理的。由此，维纳深刻地指出，“控制工程的问题

题和通讯工程的问题是不能区分开来的，而且，这些问题的关键并不是环绕电工技术，而是环绕着更为基本的消息概念，不论这消息是由电的、机械的或神经的方式传递的。”^① 维纳正是从控制论与通讯理论的内在联系中形成了信息 (Information) 这个一般概念，他不仅对控制论的建立，对信息论 (Theory of Information) 的建立也作出了卓越的贡献。1948年，数学家申农 (C.E. Shannon) 发表了信息论的奠基性论文《通信的数学理论》，从此出现了信息论这一新兴的边缘学科。信息论是控制论的理论基础之一。

以上我们分别从生物科学和技术科学两个方面说明了促使控制论形成的一些重要的理论前提和技术条件。所有这些表明，当时是有可能从技术上实现对某些智能的模拟，以达到高度的自动化水平的，但是还必须有数学与逻辑的工具来保证。数学以及现代的数理逻辑也是控制论形成的重要理论基础，并且，控制论本身就是一门十分接近数学的学科。

首先，与控制论的形成和发展密切相关的数学工具是数学分析。在控制论之前的伺服机构理论中已经广泛运用了微分方程理论。对于一个伺服机构理论，一般都能用相应的微分方程或积分方程来描述与求解，并对其系统的性能，特别是稳定性加以讨论。随着控制论的形成与发展，必须用到更多的数学工具。在这个时期，经典数学中的勒贝格积分、变分法、泛函分析等都有了较大进展，为控制论描述和处理比较复杂的控制论系统提供了有效的工具。

其次，对控制论的建立有重大影响的另一个数学工具就是统计数学，其中包括概率论与随机过程的理论。

统计数学对于控制论之所以重要，是由自动装置本身的特点

^① 维纳：《控制论》第二版，科学出版社1985年版，第8页。

所决定的。任意一个自动装置都处于不断变化的环境之中，它的自动性表现在它具有自动适应这种不断变化着的外界环境的能力。这就是说，外界环境和自动装置所采取的对策，都是具有多种可能而不确定的。但是，这种不确定性与可能情况的选择又不是完全没有规律的，而是在一定条件下具有一定的概率分布，因而服从于一定的统计规律，这就不能不运用统计数学。概率论作为数学的一个重要分支，从17世纪开始研究以来，经过贝努里 (J. Bernoulli)、拉普拉斯 (P. Laplace)、德莫娃 (Demoivre)、高斯 (Gauss) 等人的工作，取得了很多的成果。到19世纪后半叶，马尔科夫 (A. A. Markov) 建立了概率论的一个新的重要分支——随机过程理论的基础。20世纪30年代，苏联的柯尔莫戈洛夫建立了一类重要随机过程——马尔科夫过程的一般理论。在控制论的建立过程中，除了运用了这些成果以外，维纳还比较系统地研究了平稳随机过程的预测理论，以适应控制论研究的需要，这也是概率论研究中的一项进展。

为了更好地理解统计数学对于控制论建立的作用以及维纳本人与此有关的一系列工作，必需了解维纳的一个重要观点。维纳认为控制论的建立是科学内部发展的必然结果，具体地说，就是由统计方法引入物理学而开始的物理学革命的必然结果。

维纳认为，物理学发展到19世纪末，牛顿力学陷入了深刻的矛盾。一方面表现为它对一些新发现的物理现象不能圆满地加以解释，另一方面则表现为机械性的局限性日益明显地暴露出来。在牛顿看来，宇宙的一切都是按牛顿力学规律精确地、必然地运行着的。宇宙是一个严密的组织，未来的一切都是由过去的一切严格决定着。对于某一个系统，我们只要确切地知道它的初始位置和初始动量，就必然能够确切地预见到它在今后某一确定时刻的状态。这是一种机械的、拉普拉斯式的决定论。事实上，在绝大多数情况下，要满足这种条件是不容易的。这时，牛顿力学

就束手无策了。牛顿力学的这种局限性是不可能在它的内部得到克服的。

为了彻底克服这种机械性，必然要求一场物理学的革命。在维纳看来，这场革命首先是由美国物理学家吉布斯 (Josiah Willard Gibbs) 和奥地利物理学家波尔兹曼 (Ludwig Boltzmann) 开始的。这场革命的实质是将统计数学引入物理学，打破了牛顿的机械论对物理学的绝对统治，解释了牛顿力学无法说明的大量偶然性事件。在这以前，麦克斯威尔等人已经将统计方法引入了物理学，但他们只用统计方法处理大量粒子所组成的系统。只有到了波尔兹曼和吉布斯，才把统计方法彻底地引入物理学，使得这种方法不仅对具有大量粒子的复杂系统有效，而且对于像力场中的单个粒子这种简单系统也是有效的，它研究单个粒子的初始状态的各种不同位置和速度的概率分布。因为物理学的测量不可能是完全精确的，我们得到的只是初始状态在其所可能达到的精确度范围内的结果，也就是说，我们并不完全知道初始状态，而只知道它们的某些概率分布。维纳说：“这个革命所产生的影响就是今天的物理学不再要求去探讨那种总是会发生的事情，而是去探讨将以绝对优势的几率而发生的事情了。”他又说：“从那时起，物理学中所发生的情况就是把牛顿僵硬的基础加以抛弃或改变；到现在，吉布斯的偶然性已经完全明朗地成为物理学的全部基础了。”^①

维纳进一步认为，控制论所研究的系统既然也是一种动力学系统：那么，毫无疑问，也应该把统计方法移置和应用于控制论的研究之中。统计数学应该成为控制论的强有力的工具。维纳正是这样作的。早在1919年，维纳在数学的研究中就广泛接触到后来同控制论发展有密切关系的数学理论，特别是勒贝格积分和概

^① 维纳：《人有人的用处》，商务印书馆1978年版，第4页。

率论使他很感兴趣。维纳指出，勒贝格积分理论与吉布斯的统计力学看似不同实则相通。1920年，他把勒贝格积分运用于统计物理中的布朗运动的研究，这一工作与他对平稳随机过程预测理论的研究是相关的，这是一项开创性的工作，对后来概率论的研究也发生了很大的影响。维纳把勒贝格积分与统计物理的研究结合起来，还作出了其它一些出色的工作。

正是由于统计方法引入物理学，再将这些成果以及统计方法引入控制论与信息论的研究，才使得维纳在研究预测问题时，看到了预测问题中的一类问题是可以表示为极小化问题的，由此找出了一种类型的积分方程，并引导出一种防空预测方案的设计。同时，把统计方法应用于通讯理论的研究，把信息论的研究与统计力学结合起来，也就促使维纳在信息论领域中也独立地作出了贡献，为控制论的建立提供了必要的理论基础。

当然，对于维纳的上述某些观点，在学术界是有些不同看法的，有关内容将在控制论的哲学问题中提到，在此我们不作讨论。但要肯定一点，就是把统计数学与统计力学的方法移置到控制论的研究中来是必要的，在方法论上具有重大意义。

在数学方面，离散数学，特别是其中的数理逻辑也是与控制论的建立密切相关的。这是因为在控制论所研究的课题中，不仅涉及到连续量，而且涉及到离散量，特别是为了对神经系统中兴奋、抑制过程加以对应的研究，更是如此。可以说，控制论要进行智能模拟的研究，必需使用离散数学，特别是数理逻辑这类数学工具。

命题演算与谓词演算是数理逻辑的基本部分。自从莱布尼兹提出建立数理逻辑的设想与基本思想以来，经过布尔、弗雷格 (Frege)、罗素 (B. Russell) 等人的发展，到本世纪 30 年代，数理逻辑，特别是这两个演算已发展得比较完善了，但人们一直看不出这些理论成果与实际应用间的联系。到了 30—40 年代，由

于电工和电子技术发展的需要，美国的申农^①，以及苏联^②、日本^③等国的一些学者，各自独立地发现并开始将命题演算、布尔代数运用于继电器结点电路的线路设计。到了40—50年代，由于控制论等边缘学科研究的需要，神经生理学家麦克卡洛（W.S. McCulloch）和数理逻辑学家匹茨（W. Pitts）在研究如何用突触把神经纤维联结成一个系统的课题时，以数理逻辑中两个演算为工具，讨论了归根到底是属于开关网络的问题。他们在图灵思想的启发下，把数理逻辑与神经解剖学、神经生理学结合起来，在1943年发表了一篇重要论文：《关于神经活动方面诸概念的逻辑演算》，在这篇论文中，他们提出了神经网络的概念与理论，并第一次给出了神经系统的一种抽象的数学模型，这在理论上与实践上都具有十分重要的意义。从理论上说，神经网络理论作为一种电路开关理论直接影响并导致有限自动机理论的形成与发展。有限自动机理论后来逐步发展成为一种数学理论，它与图灵机之类的无限自动机一起成为研究离散数字系统的功能、结构及其关系的数学理论。在实际应用方面，它既是电子数字计算机硬件的理论基础，又为人工智能、仿生学中关于脑模型的研究奠定了基础。关于自动机理论的基本概念与内容，我们将在下一章中作简要的阐述。

① C.E. Shannon, A Symbolic Analysis of Relay and Switching Circuits, Trans. AIEE 57 (1938), 713—722.

② В.И. Шестаков, Некоторые математические методы конструирования и упрощения двухполюсных электрических схем класса, А. Канд, диссертация НИИФ МРУ, 1938.

③ A. Nakashima, The Theory of Relay Circuit Composition, Nippon Electr. Commun. Eng, 1936, n. 3, 127—226.

第四节 哲学与方法论的研究 对控制论形成的作用

恩格斯曾指出，在科学技术的发展中，理论思维有着不可忽视的作用。控制论的形成与发展突出地说明了这一点。

维纳本人是一位很注意哲学思考和方法论研究的科学家。他自称长期以来就对科学方法很感兴趣。早在1911到1913年期间，他就在哈佛参加过关于科学方法论的讨论班。到了30—40年代，罗森勃吕特（A. Rosenblueth）领导过一个每月举行一次的聚餐形式的科学方法讨论班。后来维纳也参加了。参加这个会的人是从医学、物理学、数学等方面研究的学者与专家，他们精通自己的专业，对邻近的学科也较为熟悉。他们取长补短，讨论一些具有一定联系的共同性的方法论问题。在这个过程中，罗森勃吕特和维纳越来越深刻地感到，在科学发展过程中，在那些已经建立起来的学科或部门之间，还存在着一些被人忽视的无人区，而正是在这些领域却可能得到最大的收获。维纳把这些领域比喻为未开垦的科学处女地。而以后的控制论、信息论、电子计算机等学科正是这些未开垦的处女地上开放出来的一朵朵光彩夺目的鲜花。

这些哲学的思考使维纳很注意数学、统计物理、通讯理论中的内在联系。到第二次世界大战期间，当他接受并参与自动高射火炮的研制时，他充分注意到这个任务的解决不能不涉及人的智能，因而不能不涉及生物科学这个领域，因为计算和预测都属于人的智能范围，要把这些智能用技术装置实现出来，就必需找到生物科学与技术科学之间的内在联系。维纳运用类比方法，揭示出人的智能活动和神经系统同技术装置之间存在着一定的相似

性，至少就反馈（feedback）机制来说是如此。经过维纳、罗森勃吕特和别格罗的共同讨论与研究，他们三人在1943年合写了题为《行为、目的和目的论》^①的文章，被作为哲学与方法论的论文在美国的哲学杂志《科学的哲学》上发表。在该文提出的控制论的基本思想的引导下，1948年，维纳发表了《控制论（或关于在动物和机器中控制和通讯的科学）》。

第五节 控制论的产生与进展

为了说明控制论的基本思想的提出到控制论作为一门技术科学而出现的过程，同时也为了说明控制论并不只是由维纳一人，而是由一群有关的学者集体创建的，我们在这里有必要十分简略地说明一下这个形成过程及其以后的进展情况。

关于控制论的基本思想的论文是1943年发表的。比这早一年，在纽约曾召开了一次专门讨论神经系统中枢抑制问题的会议。罗森勃吕特在会议上报告了他们那篇论文的中心思想。麦克卡洛和匹茨也参加了这个会议。1943年，他们二人发表了《关于神经活动方面诸概念的逻辑演算》一文。这两篇重要论文在同一年发表，至少可以说是一种很有意义的巧合。事实上，这两篇论文以及两文作者的工作存在着密切关系。如果说维纳等人的论文提出了控制论的基本思想，那么，麦克卡洛等的论文则是从理论上大体解决了控制论机器的技术实现问题。为了说明这二者的内在联系，不妨举出下列的事实：1943年秋天，匹茨到麻省理工学院与维纳等人一道工作。维纳拿出一些真空管给他看，并且说明

^① 罗森勃吕特、维纳、别格罗：《行为、目的和目的论》，载《控制论哲学问题译文集》第一辑，商务印书馆1965年版，第4页。

这些真空管正是用来实现他与麦克卡洛提出的神经网络的技术元件。匹茨对此感到很大的兴趣，进一步的研究使他们认识到，神经系统的兴奋或抑制以“全或无”的方式表现出来，这与电子线路中二进制的开关电路相似并且可作类比，以离散的开关装置为基础的电子数字计算机，必然是神经系统中某些功能机制的一种理想模型。由此可见，神经网络的理论为控制论基本思想的技术实现提供了理论基础。

在上述背景下，也是在1943年，为了集思广益，维纳与冯·诺意曼发起在美国普林斯顿召开了第一次有关控制论的会议，有数学家、生理学家与工程师参加。中心议题是讨论在不同领域中表现出来的某些共同性现象，也就是所谓相似性和类比问题。为了进行这种研究，他们感到有必要采取一些步骤以便获得共同的语言。正是在这个时期，他们认识到，不仅在技术系统中，而且在生物系统中也存在着反馈的机制。1946年春天，由麦克卡洛与梅氏基金会商定在纽约首次召开专门讨论反馈问题的会议。麦克卡洛等人看到了这个问题在心理学与社会学方面也有应用，又邀请了一些著名的心理学家、社会学家和人类学家参加会议。由此，心理学、社会学从控制论那里获得了一些新的观点与概念，而心理学与社会学也给控制论以某些启发，例如，感知心理学中反映整体性的完形（格式塔）概念就受到了维纳的重视。这次会议事实上已经把控制论的基本概念推广到社会学与心理学领域。为了说明这一点，还必须提到数学家冯·诺意曼与经济学家摩根斯坦（O. Morgenstern）合写的《博弈论与经济行为》这一名著，正如维纳所指出的，这是一部与控制论有别而又密切相关的著作。同一时期，从1946年到1947年秋，维纳到墨西哥国立心脏研究所与罗森勃吕特共同工作了一段。这期间，他们研究猫的肌肉痉挛现象时发现，由于某种神经紊乱，肌肉即使没有承载负荷，也会出现痉挛。这是一种反馈机制的表现。他们曾经较精确

地预测出这种反馈系统的振荡频率，为控制论的确立获得了一些新的实验数据。1947年春，维纳在去法国参加调和分析问题的数学会议时，途经英国，与图灵讨论了控制论的基本思想，还在剑桥的心理研究室参观了关于有人参与的控制过程中人的因素的研究课题。这时，他看到英国的一些学者对控制论在各方面应用的可能性也有很大的兴趣，尽管当时还没有把各种研究线索联成一气，但已强烈地感觉到了朝这个方向解决问题的迫切性。由此可以看出，在当时，控制论的建立已经成为一种世界性的趋势。

在技术上，如前所述，1946年已研制成功第一台通用电子数字计算机。1947年，麦克卡洛与匹茨设计了以耳代目的盲人阅读器，这对控制论是很有实际意义的一项技术成果。

在这期间，还有一些以控制论为理论基础的自动机器研制成功。英国生理学家艾什比（W.R. Ashby）作为控制论的创始人之一，1948年5月在由脑动电流学会在布里斯特尔的巴登（Burden）神经研究所举办的活动中，表演了他研制成功的稳态机（Homeostat）。这一成果于1948年12月发表于英国《电子学工程》（Electron Eng. 20, 380）杂志上。其后，他在1952年发表了专著《大脑设计》。他的这些工作不仅在理论上为控制论、人工智能、脑模型的研究提供了很多可贵的观点，而且在技术方面开始了对模拟智能的自动机器的研制。1950年，维纳、麦克卡洛、艾什比和沃尔特（G. Walter）等人在巴黎举行会议时还举办过一个展览会，让各种自动机器作了比赛，其中已包括了弈棋机之类的机器。1951年，申农设计了迷宫学习之类的自动装置。沃特勒（Uttler）根据1952年海耶克（Hayek）提出的分类原理设计了分类的自动装置。同年，法国的库菲尼亚尔（L. Confignal）发表了《会思考的机器》这一著作。1953年，沃尔特研究了两种自动装置，一种能模拟条件反射，称为科那（cora），另一种是比较复

杂一点的电子龟^①。这些都是属于控制论建立初期设计和研制成功的自动装置。这些技术成果提出了一个重大的理论问题，即关于机器能否思维的问题。在这一过程中，图灵在1950年发表了《计算机和智力》（中译文译作《机器能够思维吗？》），这可以说是机器思维问题上的经典性论文。

1950年，维纳为了普及控制论的知识和讨论一些有关的哲学与社会问题，又发表了《人有人的用处》。1961年，维纳的《控制论》出了第二版，他写了序并补充了两章，主要涉及学习、自繁殖机器和自组织系统，反映了这一时期控制论研究的进展。1962年，他又发表了《上帝和高兰合股公司——关于控制论冲击宗教而产生的某些问题的评论》，仍着重讨论自动机器、特别是自组织系统问题，以及有关的一些社会与哲学问题。上列诸篇是维纳关于控制论的主要著作。

控制论的研究领域也在逐步扩大，陆续出现了一些新的分支。1954年，我国钱学森发表《工程控制论》一书，这是工程控制论的奠基性著作。1956年，发表了由申农与麦克卡赛（J. McCarthy）负责编辑的重要文集《自动机研究》；1957年，冯·诺意曼发表了《计算机和人脑》；1960年，斯坦莱—约里斯（Stanley-Jones）兄弟二人发表了《生命系统的控制论》，这些论著对生物控制论、人工智能等分支学科的进展都有重大影响。

控制论是一批学者创造性劳动的成果，广泛深入的学术交流促进了它的产生和发展。从1942年开始，特别是在1946年到1953年期间，由梅氏基金会发起的一系列讨论会，对控制论的形成、建立与早期的进展产生过重大的推动作用。自从维纳的《控制论》出版后，还召开了一系列国际性会议。1950年，著名物理学家德

^① 参看F.H.George:《The Brain as a Computer》, 2nd, edition, 1973.

布罗意在法国主持召开了控制论会议。1957年9月,在巴黎成立了国际自动控制协会,并决定每年召开一次会议。值得注意的是,1975年在罗马尼亚召开的第三次国际控制论和系统会议的中心议题是讨论经济控制论。1978年在阿姆斯特丹召开的第四次控制论会议以及后来召开的第五次控制论会议都着重讨论了社会控制论问题。这表明,从60年代以后,控制论的研究逐步与系统工程、系统科学的研究相互渗透,并逐步深入到经济、社会领域。于是,控制论的普遍性在自然、社会与思维各个领域逐步展现出来。

第二章 控制论的基本理论

第一节 控制、行为与目的

控制论作为一门新兴的横断科学，对现代社会和科学技术的发展产生了重大的影响，它的理论研究已经达到相当高深的程度，但是它的基本思想，或者说它的基本理论、观点，却并不是很难接受的。正如一些尖端科学的基本思想往往植根于一般常识之中一样，控制论也是如此，一点也不神秘。

控制论的基本思想与哲学、方法论问题是密切相关的。上一章已经指出，控制论的基本任务是要在理论上找到技术系统与生物系统之间在某些功能上的相似性、统一性，以便在技术上研制出模拟智能的技术装置，即自动机或控制论机器。显然，控制论所提出的理论上的任务，是必然要涉及到哲学与方法论问题的。

这里仅以《行为、目的与目的论》一文为根据，来阐述控制论的基本理论观点。

关于控制论，至今没有一种公认的、比较完善的定义。本书将在五章二节阐述这一问题。这里只指出列尔涅尔(А.Я.Лернер)的一种定义，他认为，控制论是“一种能应用于任何系统中的一般控制理论”^①。它突出了控制论最基本的概念——控制。

什么是控制？这是控制论，尤其是理论控制论首先应回答的问题。列尔涅尔给出了关于控制的一种定义：“为了‘改善’某个或

^① 列尔涅尔：《控制论基础》，科学出版社1980年版，第1页。

某些对象的功能或发展，需要获得并使用信息，以这种信息为基础而选出的，加于该对象上的作用。”^① 这个定义表明，控制作为一种科学概念，从哲学上看，就是一种作用，严格地说，是一种特定的作用。

凡是一种作用，总有作用者与被作用者。就控制作用来说，作用者是施控装置，被作用者是受控装置。控制就是施控装置对受控装置所施加的一种作用。如果我们把施控装置看作原因，把受控装置看作结果，那么，施控装置对受控装置所起的作用，就是一种因果关系，确切些说，就是原因对结果的决定作用，这种决定作用可以在一定条件下理解为控制作用。这表明，控制是以因果作用为必要条件的。

但是，因果之间的关系是多种多样的。单一的因决定单一的果，这是一种最简单的因果关系，也是一种机械论的因果观。拉普拉斯的决定论归根到底是与单因素的分析方法密切联系在一起的。事实上，在因果之间还存在着多因素的关系，可以是一因多果，可以是多因一果，还可以是多因多果等等。在这些情况下，要弄清因对果的决定作用就要复杂得多。因为在这里，不是一种一一对应，而是在可能世界 (possible world) 中的某种特定关系。可能世界是一个重要的哲学概念，一般认为最初是由莱布尼兹提出的。它反映了现实世界中的一种复杂性。联系到我们的上述问题来说，就是指在因与果之间存在着多种可能性。用自然科学的术语来说，可以说是一种“可能性空间”^②。在这种情况下，要从多种可能性中弄清楚因对果的决定作用，进一步从多种可能的因中给出某种因，以便从多种可能的果中得到所预期的

① 列尔涅尔：《控制论基础》，科学出版社1980年版，第85页。

② 参看金观涛、华国凡：《控制论和科学方法论》，科学普及出版社1983年版，第3页。

果，这就是一种控制作用。即在一种主动干预下，使某因以实现预期的果，这比简单的讲因果作用要复杂得多，所以我们说这是一种特定的作用。

由此可知，控制虽以因果为依据，但与因果作用又有不同。关键在于它先要有预期的果，就是目的（在哲学史上也称为“终极因”），然后从多种可能中选出某种估计能得到预期结果的因，加以作用，以便得到预期的果。这才是不同于因果作用的控制作用。

所以，控制是以复杂的因果关系、以可能世界的存在为条件的。其次，控制必须有目的，即预期的果。再次，为了实现目的，必须从多种可能的因中选择出能实现目的的那种因，并主动地作用这种因以促使目的的实现，因此，控制离不开选择。也就是说，控制中要有一种能动作用。列尔涅尔对控制的定义正反映了这些特点。

由上述的分析可以看出，控制概念中最本质的属性就在于它必须具有目的，没有目的，无所谓控制。罗森勃吕特与维纳等人正是抓住了目的这个关键问题来探讨控制问题的。

长期以来，哲学家与科学家们认为只有生物系统，其中主要是人，才能有目的，至于技术系统则是没有目的的。在哲学上表现为目的论、活力论与机械论之争，从亚里士多德、笛卡尔一直到近代的杜里舒（Driesch），甚至到现代的关于还原论之争，都是与这个问题相关的。在此我们不加叙述与讨论，只需指出，有无目的，长期以来是划分生物科学与技术科学的一项决定性的标志。这两种科学的对立表现为目的论与机械论的对立。于是，维纳等人所面临的问题就是要弄清目的的机制是什么，在弄清这种机制之后，才能去查明在技术科学中有没有类似目的的相应机制。如果有，就找到了相似性，也就从这两种对立的科学中找到了统一性。维纳等人正是这样做的。

作为数学家的维纳和作为工程师的别格罗在当时对于伺服机构理论是熟悉的。伺服机构是一种闭环控制系统，也就是具有反馈线路的技术装置。伺服机构的自动功能是通过反馈来实现的。而动物与人的自动调节与控制的过程，往往表现为一种随意活动（一般是指通过大脑皮层反射的、有意识的活动），看来是与伺服机构的自动功能很不一样的，后者是有反馈机制的。那么，很自然地就会提出一个问题，在生物系统中，特别是对动物与人来说，是不是也存在着反馈呢？维纳和别格罗就这个问题请教了生理学家罗森勃吕特，其回答是肯定的。有一些神经系统疾病说明了这一点。例如，当小脑受伤时会出现目的震颤。当这种病人试图实现捡铅笔这种随意动作时，会发生一种围绕目的物来回摆动的现象。再如，中枢神经系统梅毒病中有一种叫做脊髓痨（或称为运动性共济失调）的疾病，由于中枢神经系统的这种器质性病变，病人失去了本体感受的感觉，又不能由视觉或其他感觉来补偿，使他也不能完成如捡铅笔这样的随意动作，实际上，这是反馈不足引起的。而目的震颤则是反馈过度引起的，由于反馈过度，才出现过头与不及，来回摆动的现象。总之，这些疾病都是由于反馈作用的缺陷所造成的。这表明巴甫洛夫的反射弧概念是不够用的。除了由感受器经过神经系统到效应器官以外，还应该有由效应器到感受器再回输到神经系统的反馈回路，这是一种环形的过程。图2·1（见下页）表示以脊髓为中枢的简单反射弧及其反馈回路。

由此，维纳和别格罗等人得出了一个重要的结论：人的“随意活动中的一个极端重要的因素就是控制工程师们所谓的反馈作用”^①。就是说，从结构上看，技术系统与生物系统都能具有反馈回路，表现在功能上则是它们都具有自动调节与控制的功能。

① 维纳：《控制论》第二版，科学出版社1985年版，第6页。

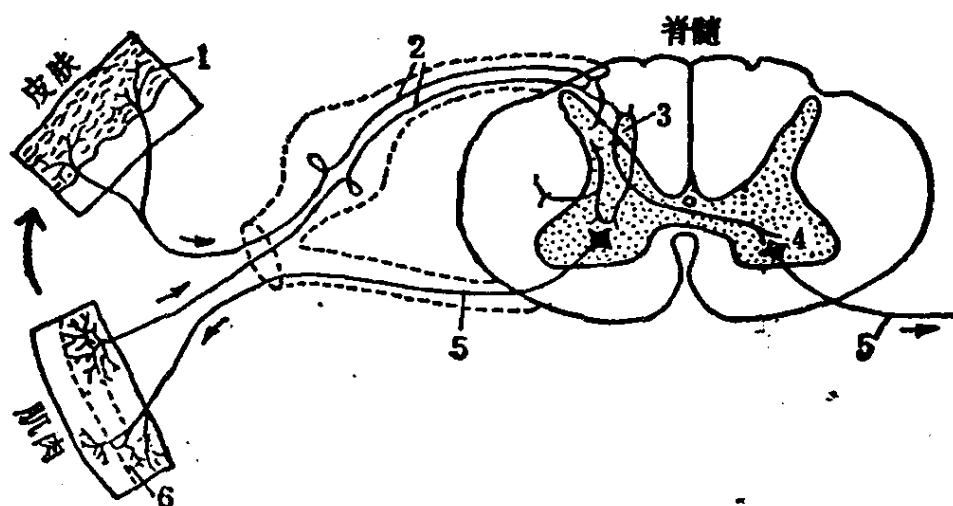


图2·1 通过脊髓的反射弧的构造简图

1.感觉（传入）纤维末梢；2.感觉神经纤维；3.脊髓的神经细胞，从传入纤维接受冲动，传向中枢神经系统中更远的地方；4.脊髓的运动神经细胞；5.运动（传出）纤维；6.传出纤维末梢。（箭头表示神经冲动沿反射弧运动的方向）

这就是这两种看来截然不同的系统之间所具有的相似性、统一性。说得更确切些，由于负反馈使得一个控制过程得以趋近其目标值（即目的），得出的结论是：“一切有目的的行为都可以看作需要负反馈的行为。”^①一句话，机器与生物一般都是通过负反馈来达到控制的目的的。这就是控制论的基本理论观点。

在上述的重要结论中，值得注意的是使用了“行为”的概念，这决不是任意使用的一个无关紧要的概念，它有着极其重要的方法论意义。大家知道，技术系统的动作一般用输入与输出来表示，生物系统的动作则用刺激与反应来表示，这两套概念是很不同的。控制论既然找到了这两个系统之间的相似性与统一性，就有可能而且有必要用一种更具一般性的概念来描述它们，这个

^① 罗森勃吕特、维纳、别格罗：《行为、目的和目的论》，载《控制论哲学问题译文集》第一辑，商务印书馆1965年版，第4页。

概念就是行为，无论是机器的输入和输出，还是动物与人的刺激和反应，都可以看作是行为。

控制论使用的行为概念是从行为主义心理学中借用过来的。控制论主要是在方法论意义上来使用这一概念的。

行为主义 (Behaviorism) 是在本世纪初兴起的一个心理学派别，其创始人是华生 (J.B. Watson)。行为主义是从动物心理学、动物行为的研究中形成和产生出来的。它以反对以往心理学研究的主观性为宗旨，主张“客观地”研究人的心理现象。它坚决地反对当时正统的构造主义或构造派心理学 (Structural psychology) 与流行的机能主义或机能派心理学 (Functional psychology)。构造主义者着重分析各种心理复合体的构造，企图找出构成各种心理活动的最基本的心理元素，并探索由这些心理元素来构造出各种复杂的心理活动的方式与规律，从而进一步以与一个心理过程相应的神经过程来解释这个心理过程。在方法上他们使用了内省的实验方法。这一派是以冯特 (W. Wundt)、铁钦纳 (E. B. Titchener) 为主要代表。机能主义则以詹姆士 (W. James) 与杜威 (J. Dewey) 等人为主要代表。他们认为，心理元素的分析不是主要的，因为心理活动是一种主动的、连续的整体，是在对环境的适应过程中起作用的一种机能。心理学应该研究心理活动的这种机能，应该用客观的观察法来补充内省法，并且广泛地运用观察法、测验法。机能派心理学与构造派心理学是直接对立的。

可是，构造主义要找的心理元素，机能主义要找的机能的原因，在行为主义者看来，都是些看不见摸不着的东西，都难以进行“客观地”研究。所以华生曾宣称行为主义者不能再满足于研究不可捉摸和不可接触的东西了。他们决定，或者放弃心理学，或者把心理学变成一门自然科学。这就是说，要对传统的心理学进行改造，这种改造就是干脆放弃对于人的心理的传统观点，不再用意识情绪等心理概念，而代之以行为的概念，于是，心理学

就等价行为的研究。华生说：“心理学是自然科学的一个把人的活动和行为作为它的研究对象的部门，它企图通过系统的观察和实验来表述作为人的反应的基础的那些规律和原则。”^① 华生把有机体应付环境的一切活动统称之为行为，而把作为行为的最基本成分的肌肉和腺体分泌称之为反应，把引发有机体活动的外部 and 内部的变化统称之为刺激。这样，人和动物的全部行为都可以分析为刺激和反应。

我们在此不对行为主义本身的哲学观点加以评论，请读者参阅有关论著。在此我们只指出其隐含的对控制论产生的影响和方法论意义。当研究人脑功能的机制遇到困难，难以弄清人脑内部的细致结构以及和功能之间的关系时，避开这个困难，改变方法，从外部的行为加以研究，这看来是畏难而退；实际上是要开辟一条新的途径，绕道前进，这在方法论上是可取的。事实上，控制论正是借用了这种方法。当我们弄不清随意活动的机制时，我们就转而研究作为其外部表现的刺激与反应之间的关系。当我们弄不清一部复杂自动装置的结构与功能时，就转而研究作为其外部表现的输入与输出之间的关系。由这两类系统的相似性与统一性，就可以把它们的外部表现统称为行为。控制论认为：“同是一个行为主义的分析，对于机器和生命机体二者都是可用的，不论行为的复杂性如何。”^② 当然，维纳并没有由此认为机器与生物是等价的，他只是就两个系统的相似性以及研究方法的共同性而言。维纳给行为下了一个广义的定义：“行为就是一个实体相对于它的环境做出的任何变化。……一个客体的可以从外部探知的任何改变就可以称作行为。”^③ 这不仅把行为主义的行为概

① J.B.Watson, 《Psychology from the Standpoint of a Behaviorist》, 1919年, 第1页。

②③ 罗森勃吕特、维纳、别格罗：《行为、目的和目的论》，载《控制论哲学问题译文集》第一辑，商务印书馆1965年版，第1页。

念推广应用于任意系统，而且在方法论上强调了对一个系统的外部行为的研究，这实际上是将系统本身当作黑箱(Black Box)。可以说，行为主义的方法就是一种黑箱方法，至于什么是黑箱方法，我们在下面还要说明，在此仅仅指出，行为主义方法对于控制论的黑箱方法来说起着一种先导的与启发的作用。所以我们说，控制论主要是在方法论意义上来使用行为这一概念的，这就是控制论与行为主义的关系。就控制论把行为推广运用于一切系统，特别是技术系统的动作来说，它与行为主义的概念又有所区别。

在科学发展过程中，一种新概念的提出，尤其是一种具有较高的一般性概念的提出，它不仅是大量现象与论据的必然产物，更重要的是它要能在更高的层次上来概括更多的现象。由行为主义的行为概念的提出到控制论把这一概念加以推广的做法来看就是如此。由此也不难理解，在《行为、目的和目的论》一文中，维纳等人为什么要从行为这个一般概念出发来构造控制论的概念体系或理论体系。这正反映了控制论的基本理论观点。维纳等人对行为这一概念的研究是值得注意的，现将该文对不同行为的分类以及分析的表照录如下，以加深对它的理解。

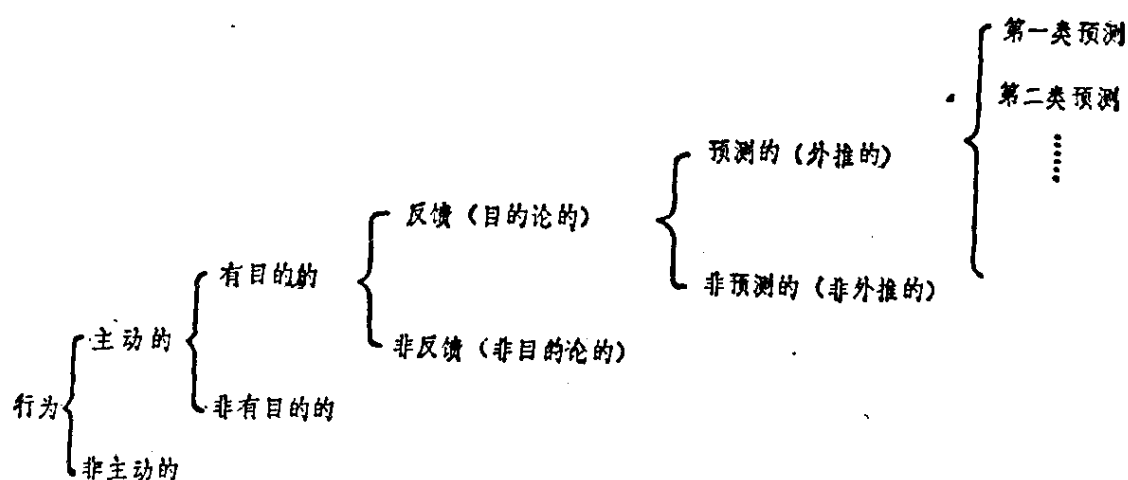


图2·2 行为分类表①

① 罗森勃吕特、维纳、别格罗：《行为、目的和目的论》，载《控制论哲学问题译文集》第一辑，商务印书馆1965年版，第6页。

维纳等人对行为的上述分类作了说明。主动行为是指系统（维纳等人用的是“客体”一词）本身是一个输出能源，它把输入所提供的能量先存贮起来，然后再供应输出。在这类主动行为中有一种是有目的的主动行为，就是所有这些主动行为的结果会趋向于一种终极条件，即目的。有目的的行为又分为反馈行为和非反馈行为。这里所说的反馈行为并未明确地讲是指负反馈行为。这里所讲的目的论就是控制论用负反馈解释目的行为（即控制）的基本理论观点。负反馈行为是指预定目标值的信号与已输出的信号相比较，得出的误差回输到系统中去，然后选择适当的输入用来不断地校正误差使之不断减小而达到目标值。这种行为比非反馈行为要有效得多。反馈行为又分为预测的和非预测的。阿米巴只能跟踪它对之起反应的那个物体，但不能预测出这个物体所将采取的途径，这是非预测行为。猫捉老鼠，并不跑向老鼠在此刻的位置，而是奔向老鼠在未来所可能达到的某一个位置上，这是预测行为。预测又分为不同的等级。“猫捉老鼠是第一级预测的一例，猫只是预测老鼠活动的途径而已。向活靶投掷石头就需要第二级预测了，因为目标活动的途径和石头运动的途径二者都应该有预见。较高级的预测的例子就是用投石器或弓箭进行射击。”^①

维纳等人在对行为进行不断的二分的过程中，注意的只是划分中的一个单侧分支，最后划分出预测行为这个类。他们认为“该类是特别有意义的，因为它提供了我们对于有机体行为所进行的越来越复杂的试验得以系统化的可能性，它强调了目的概念和目的论概念，虽然这些概念目前颇乏声誉，但它们显得日趋重要。”^②

① 罗森勃吕特、维纳、别格罗：《行为、目的和目的论》，载《控制论哲学问题译文集》第一辑，商务印书馆1965年版，第5页。

② 同上，第7页。

由此可见，维纳等人不仅从哲学和方法论上正确地分析出控制与目的的关系，或者说，在控制概念中逻辑地蕴涵了目的这个概念，而且进一步又把目的概念与行为概念联系起来。所谓目的，并不神秘，不过是一种负反馈的行为。“一切有目的的行为都可以看作需要负反馈的行为。”^①这集中说明了目的与反馈、行为的关系。有了这样一种对目的所作的行为解释，就能够将生物系统中的目的特点转移到技术系统中去，使这两种不同的系统具有相似性与统一性，使得模拟智能的技术装置成为可能，从而可以完成控制论的任务。正是行为、目的与控制这三个概念间的内在联系，使我们很容易理解维纳等人的论文为什么取题为《行为、目的和目的论》，以及为什么说这篇论文中提出了控制论的基本理论观点。

由此，我们就能理解为什么有些学者要从行为的角度来理解控制论。例如，民主德国的克劳斯（G.Klaus）认为：“构成事物的质料与形式的关系当然有某种重要性。但更加重要的是事物的行为方式、它的动态。……我们之所以能控制我们的环境，归根到底，完全是因为我们能理解事物的行为方式，甚至能制造出一种事物，让它表现出为我们的目的服务的行为方式。”^②因此，他认为“控制论是关于可能结构的可能行为方式的科学”^③。这虽不是他为控制论下的定义，但这种理解是抓住了控制论的特点的。第一，突出了行为研究的特点。第二，指明了行为研究与结构的关系。在克劳斯的提法中，行为是与结构相联系的，控制论是通过对行为的分析与研究去探索结构的。这种观点将行为、

① 罗森勃吕特、维纳、别格罗：《行为、目的和目的论》。载《控制论哲学问题译文集》第一辑，商务印书馆1965年版，第4页。

②③ 克劳斯：《从哲学看控制论》，中国社会科学出版社1981年版，第7页、10页。

机能与结构联系在一起。通过行为、机能研究结构，这是控制论在方法论上的一项重大贡献，克服了行为主义在方法上的局限性。行为主义把行为研究与心理学等同起来，把行为研究本身作为目的，而不是通过行为去研究脑的结构以及脑与意识的关系，这不仅在哲学上是错误的，而且在方法论上也有很大的局限性。在这里，我们既要看到控制论的行为概念与行为主义的历史渊源关系，更要着重看到二者间的这一重大区别，而不至于只看到将行为概念加以推广的这一区别。

在讨论了有关的方法论问题之后，现在要着重指出控制论的上述基本理论观点的重大哲学意义。应该说，其哲学意义最重要的一点就在于对目的问题作出了一种辩证唯物主义的解释，这对唯心主义的目的论、活力论是一种强有力的科学的反驳。

长期以来，在科学史与哲学史上，一直存在着目的论与机械论的严重对立。机械论否定机器与动物以及与人的区别，因而不承认目的性的存在。而目的论往往与唯心主义，甚至与宗教、神学联系在一起，“目的”、“终极因”等等往往是上帝的代名词。而辩证唯物主义认为，目的性行为是客观存在的，关键在于不应该从神秘的力量中去为目的找根据，而应该从事物本身去对目的进行说明。如何对目的作出科学的、唯物主义的解释呢？可以说，控制论从原则上回答了这个问题。所谓目的，在控制论看来，不过是系统与环境之间反馈行为的必然后果，是完全能由事物本身加以辩证地、唯物主义地解释的。维纳等人曾明确讲过，“目的论行为成了受负反馈控制的行为的同义语，它由于充分限制了内涵而得到了精确的含义。按照这个作过限制的定義，目的论与决定论不是对立的”。^①应该说这是控制论在科学史与哲学

^① 罗森勃吕特、维纳、别格罗：《行为、目的和目的论》，载《控制论哲学问题译文集》第一辑，商务印书馆1965年版，第9页。

史上所作的重大贡献之一。

第二节 控制系统与控制论系统

在上一节中，我们说明了控制论的基本思想、基本理论观点，其中涉及到的一些基本概念有待进一步阐明，以下将对这些概念做一些直观的、简要的概述。

控制系统

由上节的分析可以看出，所谓控制，直观地说，就是指施控主体对受控客体的一种能动作用，这种作用能够使得受控客体根据施控主体的预定目标而动作，并最终达到这一目标。控制作为一种作用，至少要有作用者（即施控主体）与被作用者（即受控客体），以及将作用由作用者传递到受作用者的传递者这三个必要的元素。例如，在一部最简单的控制装置中，它至少要有施控元件、传递线路与受控元件三个组成部分。有了这三个组成部分，作为一个整体才能具有控制的功能与行为，而这些又总是相对于某种环境（介质）而言的。由于系统是指由一些相互制约、相互作用的元素构成，并具有整体的功能和综合行为的统一体。所以，上述三种元素就组成了相对于某种环境而具有控制功能与行为的控制系统。一个控制系统可用下列框图表示：

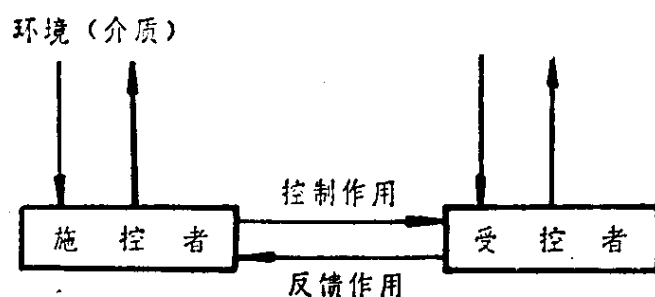


图2·3 控制系统框图

由上图可知，不仅施控者作用于受控者，而且受控者也可以

反作用于施控者。前种作用是控制作用，后种作用存在时则是反馈作用。对此，以下还要分别情况加以说明。此外，作为一个特定的控制系统，总是相对于一定的环境而言的，这二者之间也存在着相互作用。可见这些相互作用是很复杂的。控制系统的控制功能就是通过这些相互作用而实现的，是在不断变化的过程中实现的，因此，控制系统必然是一种动态系统，控制过程必然是一种动态过程。用哲学语言来说，控制是在不断地运动、变化、发展过程中实现的，控制概念按其本质来说是与辩证法一致的。当控制所要达到的目的是某种稳态时，这种稳态在本质上是一种动态平衡。所以，控制系统具有动态特性。了解了这种特性，将有助于我们理解控制过程为什么必然要有一个过渡过程。关于这一点，我们在下面再讨论。

开环控制系统与闭环控制系统

控制系统根据有无反馈回路区分为开环控制系统与闭环控制系统两大类。为了说明二者的区别，我们先举一个通俗的例子^①。

我们已经知道，控制论这个术语的含义是与掌舵术有关的，所以我们用一个航行的例子来说明。请先看下列三图：

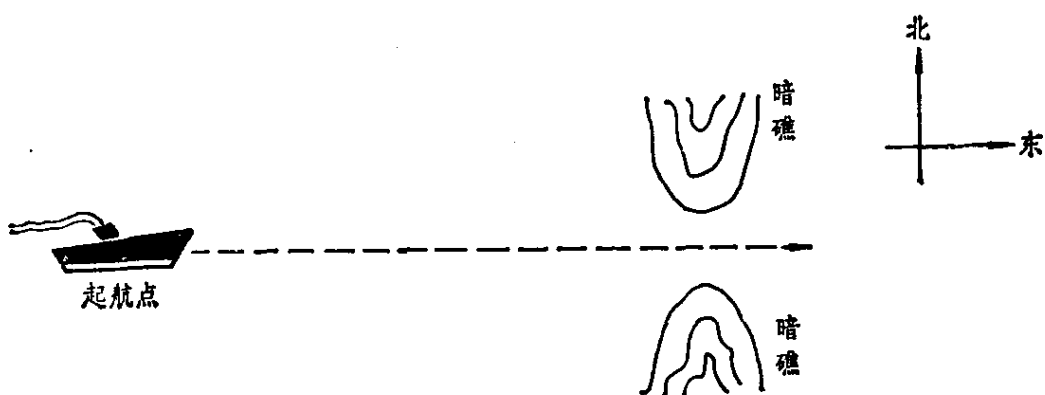


图2·4 航行问题

^① 参看《科学技术百科全书》第24卷，科学出版社版，第481页。

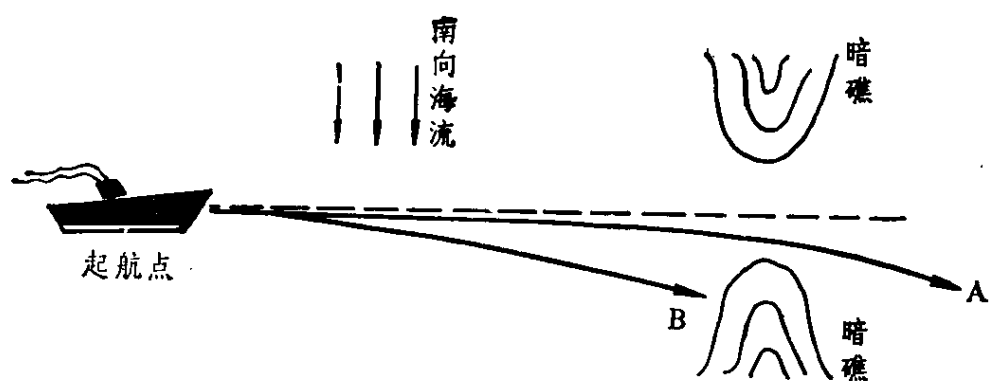


图2·5 无负反馈时的航线

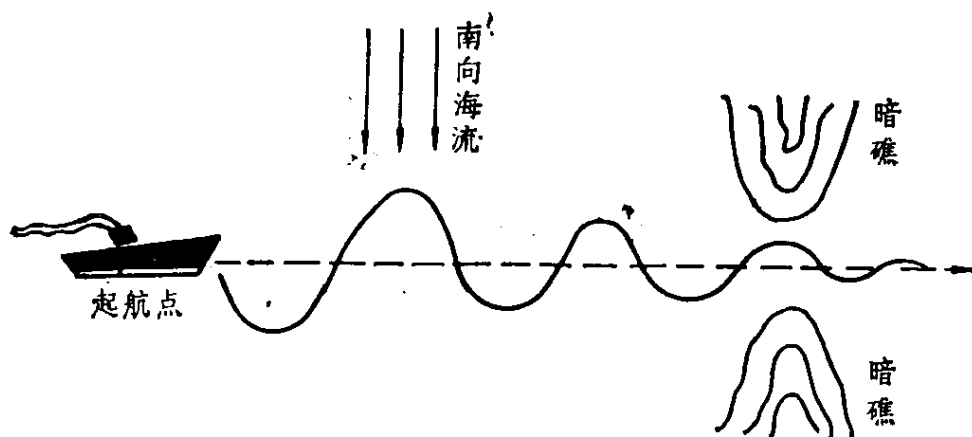


图2·6 有负反馈时的航线

都有暗礁的海峡。如果这艘海轮上的驾驶装置能观测到暗礁并确定了正东的航向，但由于装置比较简陋，没有反馈回路，一旦出现比较强大的南向海流的干扰，又遇到大雾，使驾驶员与驾驶装置系统不能自动将偏离的航向加以修正，那么在一定范围内，海轮将沿图2·5所示的A线通过暗礁。但是，如果南向海流过于强大，超过所容许的范围，则海轮将沿图2·5所示的B线而触礁。反之，如果这条海轮装备有反馈回路的自动驾驶仪，它能随时观测到对正东航向的偏离度，通过反馈回路加以回输，采取纠偏措施，使得出现如图2·6所示的航线，这是一条“万变不离其宗”的航线，保证海轮安全绕过暗礁通过海峡。

在上述的两种驾驶装置中，前者属于开环控制系统 (open-

loop control system)。这种系统的输入直接控制着它的输出,它的装置简单,当然成本就低,这是优点。但是,它的抗干扰能力差,这是一个重大的缺点,这使得它的控制作用受到很大的限制。反之,闭环控制系统 (closed-loop control system) 是带有反馈回路的,所以它的输出不仅由输入,而且要由输出的回输来共同控制。由下列框图就可看出二者的区别:

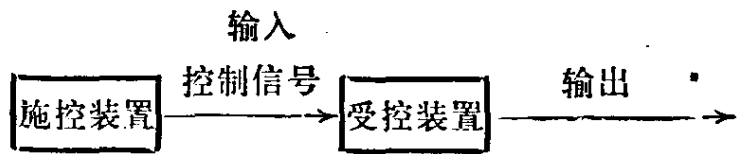


图2.7 开环控制系统

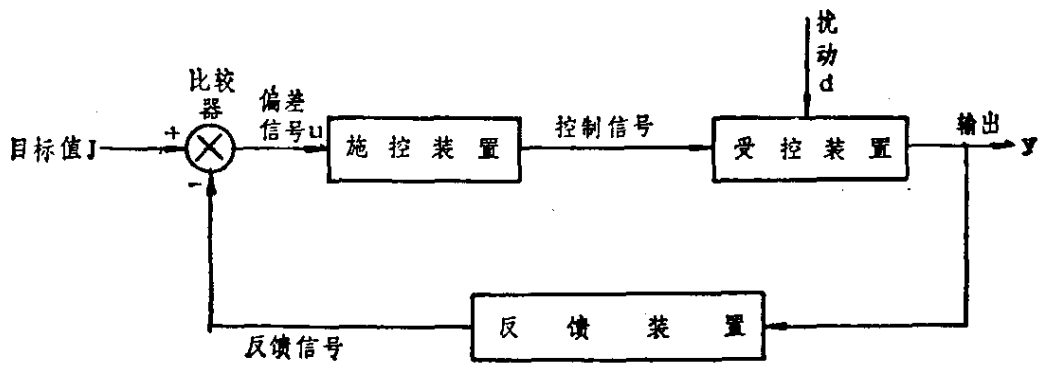


图2.8 闭环控制系统

反馈：负反馈与正反馈

由图2.8可以看出,所谓反馈,就是将输出回输到原系统中去。这一概念是1920年由贝尔实验室的哈罗德·布朗克首先在文献中提出的,当时是指电子放大器输出信号再回输到其输入端。后来这一概念的使用范围扩大了。一个闭环系统的输出值 y 要通过反馈装置回输到原来的输入端,再经过比较器与已给定的目标值 J 相比较,得到偏差信号,其值为 $u = J - y$, 它又成为新的输入值。

由闭环控制系统中 $u = J - y$ 这一值的变化特性，可以将反馈区分为正反馈和负反馈。如果目标值与输出值的差值 u 愈变愈大，或是不稳定，这就是说，经过一系列的输入之后，系统的输出值与目标值的偏差愈来愈大，离目标愈来愈远，这就是正反馈。这时的 u 值从总的趋势说是单调上升的，或是发散的。反之，如果 u 值从总的趋势说，是收敛的，是单调下降而趋近于零的，则是负反馈。说得通俗些，负反馈的特点就是检出偏差，纠正偏差，以达到目标。也就是说，经过一系列的输入、输出值的相应序列从总的趋势说逐渐达到了目标值。我们强调从总的趋势说，是指在这个过程中，并不排除有可能出现来回偏离目标值的情况，这一般是由振荡所造成的。例如，在图2·6中，由于负反馈的作用，实际的航线是对选定的正东线有所偏离的，但总的来说是偏离越来越小而逐步接近和达到正东线的。从这个例子可以看出，装有反馈回路的控制系统，虽然装置复杂些，成本也高些，但具有抗干扰达到预定目标的能力，这是一个突出的优点。所以，从古代的“掌舵术”到近代的导航与操舵装置，都是负反馈的控制系统。我们由此不难理解，维纳为什么选用与“掌舵人”同义的“控制论”这个术语来命名这一学科，为什么以负反馈作为控制的机制。

如果说，在控制论看来，负反馈是控制的机制，那么正反馈则是越来越偏离目标值，甚至失去控制。这样看来，似乎正反馈只起破坏的、消极的作用。其实，这种看法是片面的。事实上，在有的系统中，恰恰需要正反馈作用。例如，在原子弹的引爆装置中，就要用到裂变链式反应，这种裂变链式反应就是一种正反馈过程。当用慢中子碰撞铀（如 U^{235} ）时，所放出的能量和中子就是越来越大、越来越多的。又如在植物保护中，为了消灭有害的昆虫，往往用大量繁殖这种害虫的天敌来灭虫，这也是一种正反馈过程。由此，我们在学习控制论的基本理论时，在重视负反

馈作用的同时，并不能由此而推论出正反馈是不重要和可以忽视的。国外有些学者从60年代提出所谓第二代、第三代控制论，强调了正反馈的作用。从哲学上来说，对立面的斗争与统一的辩证法法则，有助于我们进一步认识负反馈与正反馈的辩证关系。如果对负反馈掌握得不好，因振荡而破坏了系统的稳定性，负反馈就有可能转变为正反馈。而且，在有的系统中，负反馈与正反馈之间有着互补的、或相辅相成的关系。在上面的后一个例子中，当害虫的天敌由闭环控制系统中的正反馈而大量繁殖时，就相当于在这个开环控制系统中天敌的输入增加，直接导致这种害虫的减少与消灭。在这个控制系统中，包括了两个子控制系统，一个是开环控制子系统，另一个是具有正反馈的闭环控制子系统。由这两个子系统组合起来（也可说是耦合起来）就成为一个控制系统。这是一种组合式的控制系统。在现实的生产、科研与生活中常常遇到的是这类控制系统，大系统控制理论专门研究这类复杂系统。不过，在经典控制论中，则是研究单个的系统，而且一般限于单输入与单输出，即所谓单变量系统，也可以说，经典控制论是对大系统中的细胞层次进行分析研究。

前馈

随着控制论及其应用的研究进展，有一些控制系统，特别是比较巨大和复杂的系统，只有反馈回路已不够了。由此又出现了前馈（feed forward）的概念和技术装置。在技术上，它可以耦合在开环控制系统中，但更主要的是与反馈相互补偿而耦合成前馈—反馈系统。我们知道，反馈的作用是要检出偏差，纠正偏差，但有的受控装置的惯性或滞后现象比较严重，外界的扰动不能立刻奏效，而只能在过一段时间之后才能明显地影响到输出量的变化。这种惯性或滞后现象必然影响到检出偏差、纠正偏差的时效与作用，由此影响到系统的控制性能。因此，有必要出现前馈这种回路。这就是不等扰动影响到输出量时，只要这种扰动是

可以测量出来的，就把它预先测量出来，通过一定的前馈装置送到系统中去进行调节，使得在输出量变化之前就尽可能地克服或减小扰动的影响。总之，就是尽可能在系统发生偏差之前，根据预测的信息，采取相应的措施，这就是前馈。把这种前馈回路与反馈回路耦合起来，就构成前馈—反馈控制系统，这种系统能达到较好的控制效果。图2·9是表示前馈—反馈控制系统的框图：

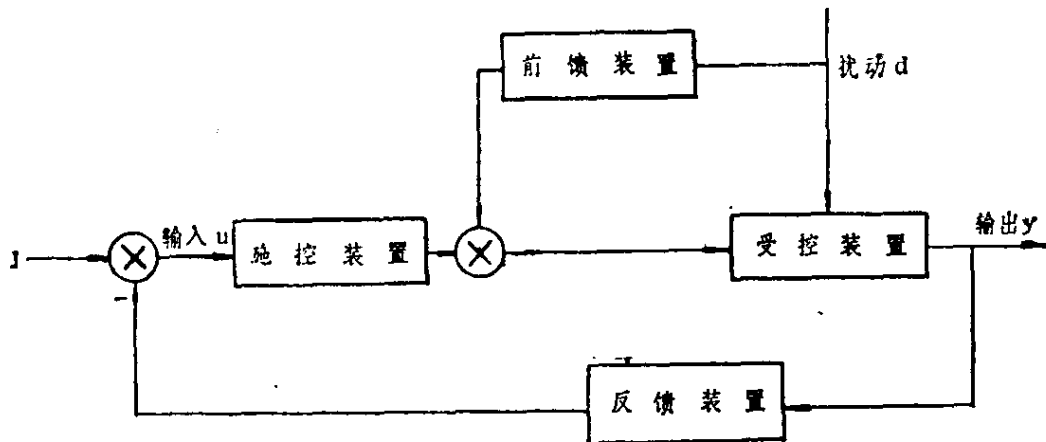


图2·9 前馈—反馈框图

上述的前馈—反馈控制系统不仅在工程技术系统中有所应用，而且在生物与社会系统中也有这种机制。

控制论系统

根据上述的概念，我们可以进一步弄清楚控制论系统这个概念。控制论当然以控制系统作为研究对象。但严格说来，开环控制系统并不属于控制论的研究范围，而属于自动控制理论的研究范围，控制论一般只研究带有反馈回路的闭环控制系统。我们称之为控制论系统。所以，控制论的研究对象并不是任意的控制系统，而只是其中的一类，即带有反馈的控制系统。列尔涅尔是把这两种系统加以区别的。他认为控制系统是指客观上存在着控制过程的一切系统，而控制论系统则不仅要求这个系统是控制系统，而且还取决于研究这个系统的工作者所持的观点与方法。他说：“‘控制论系统’这一术语不仅规定了确定的一类系统，还规

定了研究这种系统的途径。”^①这里所说的途径，就是指的控制论的途径，即控制论的基本理论观点与方法。就反馈这一基本观点来说，显然要把控制论系统限于闭环控制系统。这至少是控制论系统的基本特点之一。当然，还有其它的特点，留在以后讨论。

闭环控制系统的稳定性

具有反馈的闭环控制系统的作用是检出偏差，纠正偏差，为的是达到目标。由于目标本身的条件不同，达到目标的方式也就不同。由此分类，控制系统主要有以下两种：

1.定常控制系统：这种系统中所给定的目标是固定的，也就是说，其输入值是给定值或随时间缓慢变化的值。当由于扰动而出现偏差时，要求这种系统能自动将其输出（被控制量）保持在给定值所容许的范围内。上述的那条海轮所要达到的目的是通过有固定宽度的海峡。船上的自动驾驶仪就是这种系统。这种系统也可称为定值控制系统或自动镇定系统。

2.随动控制系统：这种系统中所给定的目标是运动、变化着的，也就是其输入不是给定值，而是随时间变化的函数（事先无法预测其变化规律），这就要求输出的被控制量能够按照某种规律以一定的精度跟随输入的变化而变化。例如我们的视觉控制中的眼球对于目标物，地对空导弹射击飞机等等，都属这类系统，这类系统也可称为跟踪系统。

尽管在这两类系统中，有的目标是固定的，有的目标是运动变化着的，因而达到目标的方式可以不同，但在要求达到目标这一点上则是一致的。所以说，反馈系统的检出偏差、纠正偏差是一种手段，其目的则是要达到目标。这是自动控制系统的核心问题。当这个系统处于检测偏差、纠正偏差的过程时，它显然处于一种不稳定、不平衡的状态中，一旦达到了目标，它就稳定了、

^① 列尔涅尔：《控制论基础》，科学出版社1980年版，第10页。

平衡了。所以，控制过程是一种从不稳定到稳定的过程。达到目标的问题，在一定的意义上说，就是一个稳定性的问题。在理论上，稳定性是与目的性相关的一个概念。如果说，一个控制系统要以反馈为手段达到目的，那么稳定性就是达到目的的一种性能指标。

稳定性理论是自动控制理论、工程控制论中的一个重要组成部分。它是建立在数学的稳定性理论基础之上的。我们在此只能简要地说明一下它的基本概念。

为什么会出现稳定性问题？这是因为自动控制系统是一种动态系统，因而控制过程必然有一种过渡过程，控制系统必须在这个过渡过程中才能实现稳定性。这个过渡过程，在自动控制理论中也称为动态过程。

我们仍用前述的海轮穿过暗礁的例子来说明。

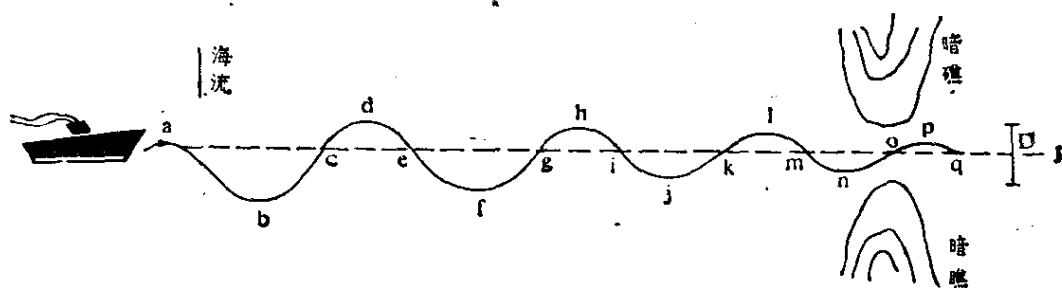


图2·10 海轮通过暗礁的实际航线图

如图2·10所示：海轮由a点起航，由a到两暗礁间宽度D的中点连线aJ是给定的航线。由于海流的扰动作用，海轮在事实上不能按aJ的直线方向通过暗礁，只能由a沿ab方向前进。在这海轮上安装有自动驾驶仪。海流对海轮的作用作为一种输入传入自动驾驶仪，但不能立刻发出纠偏的指令，而必须在通过反馈装置，经过比较器，得到偏差信号以后才能调整船舵的方向，因为这是需要经历一段时间的。在这段时间间隔里，海轮已经从a到了b处。在b处，掌舵装置才执行偏差信号的命令，使海轮纠正偏向，由b转向bc方向航行，一直到达c或接近c点处。看来似乎可以回到

ce方向，其实不然，因为海轮到达c点后，由于受控船体的惯性等因素的作用，迫使它继续向cd方向前进，而不是向ce前进。于是自动驾驶仪又发出相反方向的纠偏信号，使海轮再沿de方向回到给定的航线上来。如此来回偏离，这就发生了振荡。经过一段衰减的振荡过程之后，例如到了mno和opq这两个波间时，才可以说是达到或趋近于给定的航线了。所以，海轮从a点启程到通过二暗礁的中点，并不是沿着一条直线aJ，而是经过往返的振荡才逐渐稳定在预定航行所容许的范围之内的。这个范围就是两暗礁之间的距离D。显然，距离D越小，越难通过，也就是对稳定性的条件限制愈严，要求稳定的准确度越高。如果振荡得很厉害，而且衰减的时间长，即达到稳定的速度慢，就不利于海轮达到穿过海峡暗礁的目的。这是与稳定性的性能有关的几项重要因素。

由上述例子可以看出，稳定性是与闭环控制系统的目标值密切相关的技术概念。稳定是指对目的、目标值的稳定。稳定与振荡是一对矛盾，稳定是要趋向目标值，而振荡则要背离、偏离目标值。只有经过一段动态过程，才能克服振荡，使之衰减，趋向稳定，达到目的。这种哲学的分析，有助于我们对这些概念之间的关系的理解。

根据以上直观的叙述，我们就不难理解工程控制论中的这些概念了。

设一闭环控制系统，当外在环境对它没有输入时，它处于平衡的、稳定的状态。一旦外界给以输入（包括扰动在内，扰动也是一种输入），它就失去平衡，处于不稳定的状态。为了再达到稳定状态，就要经过一个过渡过程，也称为动态过程。如图2·11所示，以J表示给定的目标值。在 t_0 时刻，给以输入 $u(t_0)$ ，输出曲线为oa，并达到目标值J，而oa几乎与oJ重合，这实际是不可能的，因为从输入到输出至少也要经历一段十分短暂的瞬间 t_b 。这也就是说，对于任一闭环控制系统，在输入的同时，输出即达到

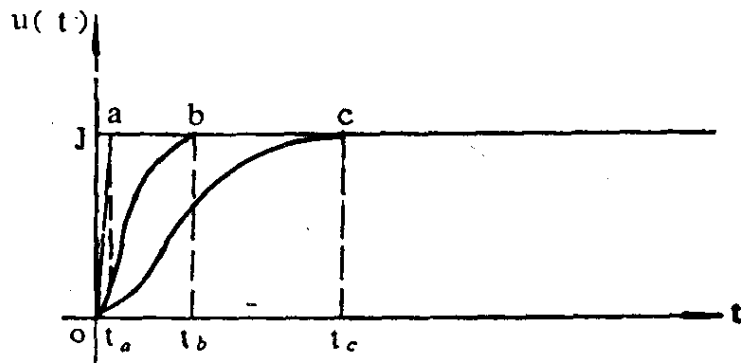


图2·11 输出逼近目标值的理想状况

目标值是不可能的。其次，如输出曲线ob与oc，在经历相应的时间 t_b 及 t_c 以后达到了目标值，其中经历了一段过渡过程如 ot_b 、 ot_c ，这种情况虽然是可能的，但象ob、oc曲线如此平稳地达到目标值却属于比较理想的情况。事实上，由于一系统受到外界环境的作用，也由于系统及其元件的惯性、贮能特性等因素的作用，输出量的变化一般表现为振荡过程。若这个振荡过程随时间推移而衰减，则经历一段时间后，输出量将趋近或达到目标值，则系统是稳定的。图2·12就显示了这种振荡的、趋于稳定的过渡过程。

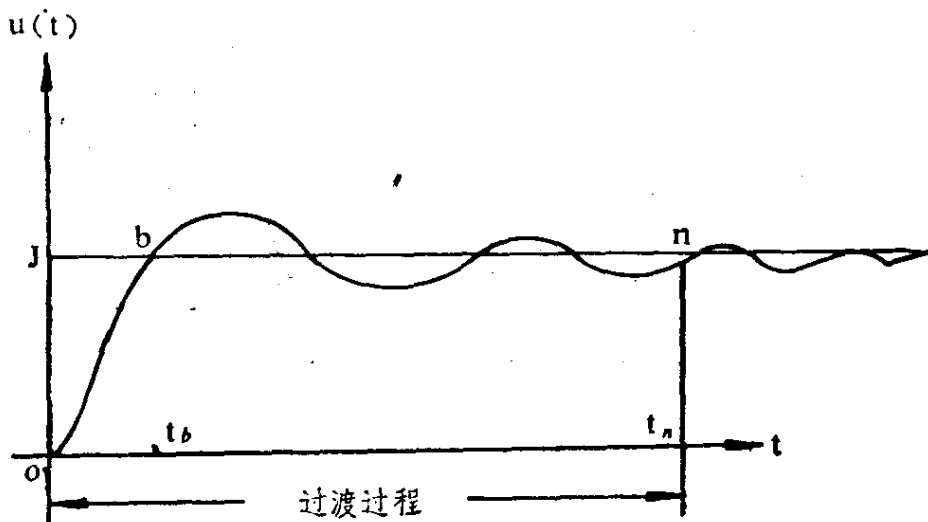


图2·12 系统的过渡过程曲线

将图2·11与图2·12对照起来，仍以输出曲线ob段为例，我

们可以看出，事实上在b点并不能稳定在目标值上，而是形成反复偏离目标值的振荡曲线。由于这一振荡是个衰减过程，所以到 t_n 时刻，振荡过渡到了稳定状态。稳定状态表现的是系统的静态特性，振荡则表现的是系统的动态特性。只有对一个系统的动态特性与静态特性都有所认识，才能检测这个系统的性能。在这些性能中，由于控制系统的任务在于达到目标值，所以稳定性就成为控制系统性能的首要标志。

一个控制系统的稳定性程度至少与以下几项指标有关：

1. 振荡度。振荡度指在同样输入下，输出曲线的振荡程度，振荡度的大小要用振荡的振幅、频率等来衡量。作为稳定性的必要兼充分条件是要存在振荡衰减过程，而这又是与负反馈密切相关的。

2. 稳定速度。稳定速度指从振荡状态转入稳定状态的速度。一个好的控制系统要求这个速度要快，也就是过渡过程要短。如图2·13所示，图2·13(a)显然比图2·13(b)的稳定性能差。

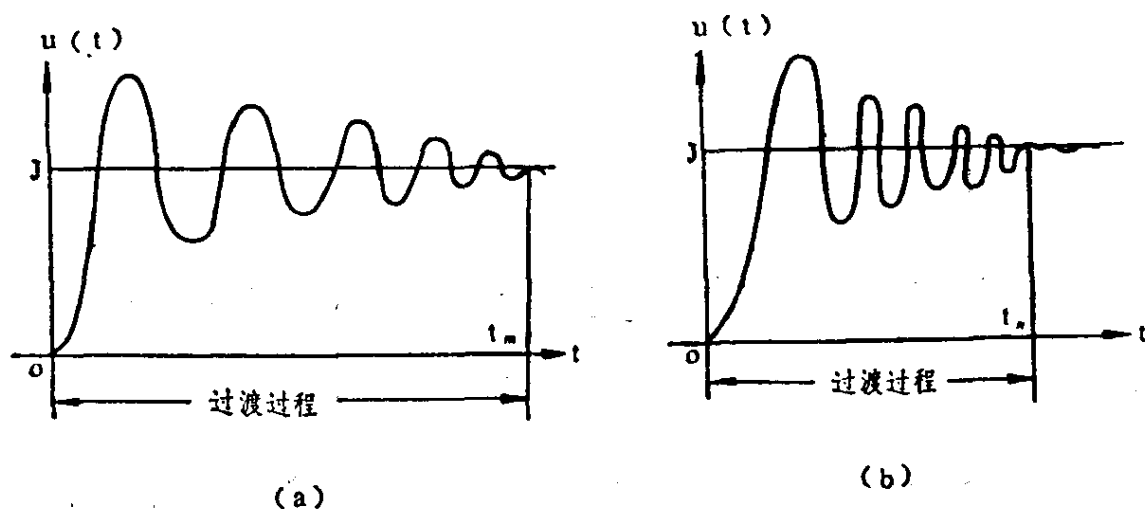


图2·13 稳定的速度问题 ($t_m > t_n$)

3. 稳定的准确度。系统稳定的准确度是根据输出值与给定的目标值之间偏离的大小来确定的。如果对准准确度要求高，系统当

然不容易稳定。在前述海轮通过海峡的例子中，如果海峡越狭，即 D 越小，则稳定的准确度的要求越高，海轮也就越难通过，反之，则越易通过。这就是说，由准确度规定了稳定的范围。如图2·14所示，由于准确度的取值 $D_a < D_b$ ，所以图2·14 (a) 要比图

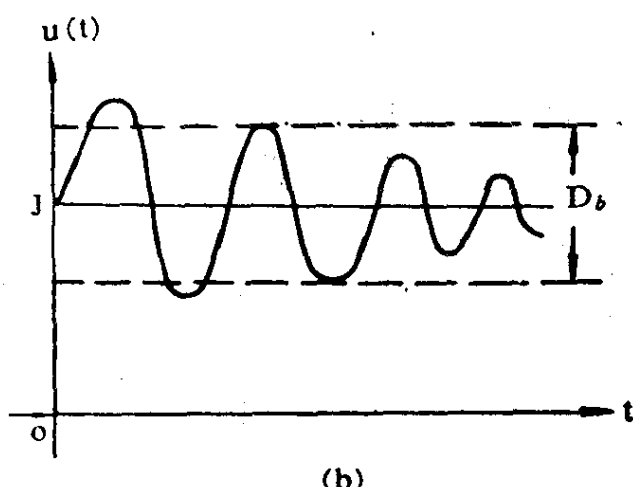
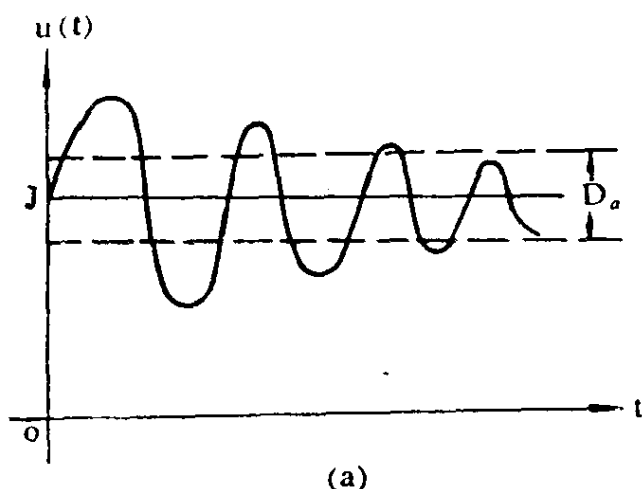


图2·14 稳定的准确度($D_a > D_b$)

程已经结束，但输出量仍然不能完全达到目标值，于是就出现了稳态误差，但它必须满足准确度的要求。当然，对于精确的控制系统来说，稳定误差总是越小越好。

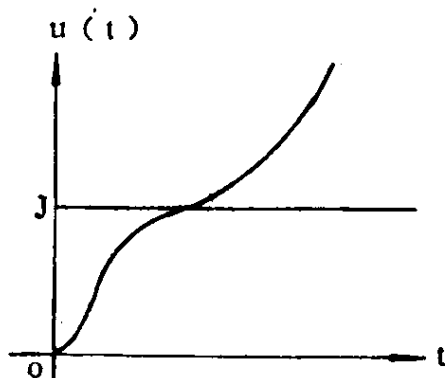
与稳定状态相反，如果振荡曲线不是衰减的，则是不稳定

2·14(b)较迟进入稳定状态。可见稳定度是有一定范围的，它与准确度成一定的反比关系。有的著作认为，稳定“本来是主观上规定的术语”^①。这种观点是不确切的。事实上，任一给定的控制系统，对于准确度以及它所容许的稳定范围是不能由主观任意规定的，而是由对该控制系统的性能要求所客观地规定了的。

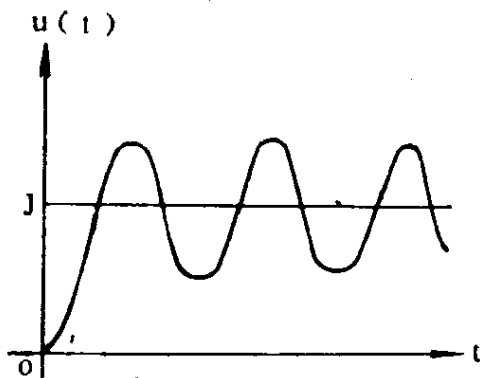
与准确度相关的另一个技术概念是稳态误差。在某些条件下，当过渡过程已经结束，但输出量仍

① [日]上濠致孝等：《自动控制理论》，国防工业出版社1979年版，第111页。

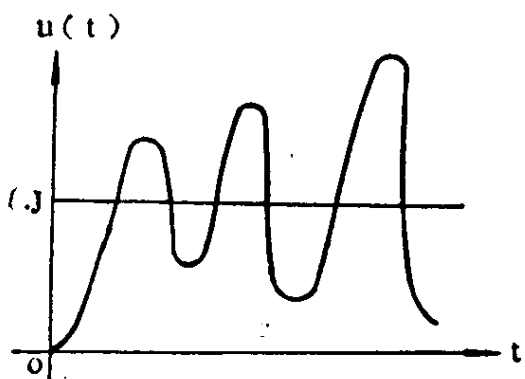
的。如图2·15的 (a)、(b)、(c) 所示。



(a) 单调发散



(b) 等幅振荡



(c) 振荡发散

在下列的三种不稳定状态中，(b) 又称为临界稳定。如果取准确度略大于其振幅，它就转化为稳定状态，而振幅的大小就是其稳态误差。(c) 实际上就是正反馈的输出曲线，当然是不稳定的。

图2·15 不稳定过程

由上可知，闭环控制系统由于具有反馈回路，因此不得不研究其稳定性，在技术上，则有个调试问题。而开环控制系统就没有调试问题。

第三节 控制与信息

我们在弄清楚了什么是控制系统及其有关的一些基本概念之后，就要进一步弄清楚控制与信息的关系，特别是控制论系统与信息的关系。

上节已经明确指出，控制论系统不仅是控制系统，而且是以

控制论的基本观点与方法去研究的控制系统。这首先是反馈的观点，也就是把控制看作是负反馈的观点。因此控制论系统的一个特点就是它必须是一种闭环控制系统。

伺服机构当然也是一种闭环控制系统，但伺服机构并不一定就是控制论系统。换句话说，具有反馈回路的控制系统并不一定就是控制论系统。这是因为具有反馈回路只是控制论的必要条件之一，而不是充分必要条件。本节所要指出的就是作为控制论系统的另一个必要条件，即信息。

在伺服机构中，反馈回路是一些实际的元件、部件、线路、管道等。例如，我们在第一章中曾提到过蒸气机的离心调节器的反馈原理，在这种调节器中，当负荷增加，速度减慢，则进入气缸的输入管道的阀门上提，进入的蒸气质量与能量增加，动能增加，使活塞运转加快。这实际上就是说，当负荷增加，速度减慢时，主要是由蒸气的质量与能量来起反馈作用的。说得具体些，在负荷、车轮转速与活塞转速之间是存在着时间与空间上的间隔的。当负荷增大，速度减慢而又要求达到维持正常速度这个目的时，总要有一种信号使得活塞运转加快。在这里，输入的蒸气量及其能量就起了这种信号作用。这种信号作用是与反馈作用密切相关的。如果没有这种信号，就不能动用反馈这种作用。在一个控制系统中，反馈作为一种手段，必须使用得当。用不用？如果用，又如何用？用到什么程度？这就要靠信号来指挥，来调度。换句话说，只有在信号调度下，反馈才能发挥相应的作用，使系统达到控制的目的。由此可见，信号、反馈、控制以及目的是不可分的。在上述的例子中，这种信号以及相应的反馈作用是通过质量、能量以及相应的牛顿力学规律起作用的。在这类机械的、电机的系统中，信号的大小一般是与能量、质量的大小成比例的，也就是具有线性关系。如果是一个通讯系统，情况就不完全如此。例如，有一架遥控飞机，地面指挥站通过无线电信号指挥

它的航向，以达到一定的目标。显然，这里的信号，就其能量与质量来说，都是很小的，而被它所操纵、控制的飞机及其部件的质量、能量都是很大的。在这类系统里，发挥信号作用的质量、能量与信号作用的大小一般是不存在着比例关系或线性关系的。这表明，在这类系统中，一定的质量、能量虽能起信号的作用，或者说，信号虽然总要以一定的质量、能量作为其载体，但信号的上述特点证实了信号概念不能归结为质量、能量的概念。与控制作用紧密相关，信息应作为一种独立于质量、能量概念之外而与之并列的概念。

以上是就技术系统而言的。除此以外，生物系统中的控制过程也是需要信号起作用的。就动物与人来说，这类信号是与神经组织、神经系统和内分泌系统相关的。就神经系统来说，信号采取神经脉冲的方式。对于高级的、复杂的神经活动、心理活动来说，情况就复杂得多了。例如巴甫洛夫早就提出过两种信号的学说。第一信号与感觉知觉相关，而第二信号则是与思维相关的语言。虽然有声语言的传递总要以空气为介质，要有相应的声波，但语言所代表的语义与效用的信号意义却复杂得多，而且一般更难定量地测定其与质量、能量的关系。尤其是涉及到认识、情感与情绪、意志等心理的、精神的领域，它们的信号作用在表现方式与特性上与技术系统中的信号作用就更加不同。在人们的交往中，眼神的细微差别所表示的不同的信号作用，与那些通过某些质量、能量在机械、电机的伺服机构中所起的信号作用，与那些通过一定的反射弧的神经脉冲信号或体液中的离子浓度，甚至遗传密码的信号作用等等，是互相区别的，但就它们都起信号作用这一点来说则是一样的。还有在社会中起信号作用的种类就更复杂了。由上可知，控制离不开信号的作用，而信号的方式与特点是各式各样的。对于机械的和电机的伺服机构来说，质量和能量本身所起的信号作用，与生物系统、社会系统中的信号中质量、

能量所起的作用是有很多不同的特点的。但是，既然控制论用反馈的观点看到了技术系统与生物系统之间的相似性、统一性，那么也就应该从它们各色各样的信号中抽象概括出一种一般的信息概念来表示对控制的指挥作用。

由以上两方面的分析，即一方面是信号有不同于质量、能量的独立性特点，另一方面是信号的形式多样性及其作用的一致性，都要求提出一种新的概念，即信息（information）概念。信息是我们通常所说的信号、消息、情报、指令、密码等概念的总称，也可以说是在这些概念的多样性基础上经过科学抽象而形成的一种一般性科学概念。至今人们对信息还没有一个公认的定义。从来源的角度看，信息是用以表征客体变化或客体间相互差异或关系的；从认识的角度看，信息指主体对于客体的不定性的认识程度，即获得知识的程度，所以申农把信息理解为一种概率的增加。

早在50年代，苏联的索波列夫就指出过：“控制原理的实质在于，巨大质量的运动和行动，巨大能量的传送和转变，可通过带有信息的不大的质量和不大的能量来指挥和控制。这个控制论原理是任何控制系统的组织和工作的基础。因此，研究信息的传送和转换规律的信息论，是研究自动机器与生物体中控制与通讯的共同原理的控制论的基础。”^①我们引用这一段话，是用来说明信息确有不同于质量、能量的特点，以及为什么信息论是控制论的基础。这段话集中反映了维纳等人关于控制与信息关系的基本观点。

维纳等人关于控制论的一个基本理论观点，就是认为控制系统也是一种信息系统，因此必须用信息的观点来研究控制系统，

^① 索波列夫：《控制论的若干基本特征》，载《外国自然科学哲学资料选辑》第四辑，上海人民出版社1965年版，第93页。

这也是控制论系统的另一个特点。维纳说过：“根据通讯工程的知识水平，别格罗先生和我已经清楚地知道，控制工程的问题和通讯工程的问题是不能区分开来的，而且，这些问题的关键并不是环绕着电工技术，而是环绕着更为基本的消息概念，不论这消息是由电的、机械的或是神经的方式传递的。”^①

正是由于控制论研究的理论需要，维纳也研究了信息论问题。1948年，维纳发表的《控制论》这一奠基性著作中，用相当的篇幅探讨了信息论问题。与此同时，申农也发表了信息论的奠基性论文。这种时间上的巧合说明了这两门新兴学科的内在联系。一般公认申农是信息论的奠基人。但事实上，正如我们在下一篇中将指出的那样，在当时是由三条渠道提出信息论的，申农从通讯理论方面，费希尔（Fisher）从统计方面，而维纳则是从控制论方面提出了信息论。

我们在下一篇中要专门概述信息论的基本内容（包括信息概念的含义）与哲学问题，这里只着重从控制与控制论的角度来讨论信息与控制、控制论的关系。

以上从控制论角度分析了信息对于指挥反馈达到控制目的的作用；指出了信息不同于质量能量的特点；由于不同系统中信号形式的多样性，为了用统一的控制论观点去处理这些不同的系统，就有必要形成一种具有一般性质的信息概念。所以，信息论的重大贡献之一，就是在科学史、技术史上第一次提出了与质量、能量并列的信息概念。在一个技术系统中，信号的形式是多样的。例如，在一个通讯系统中，由信源发出的是消息，将消息进行编码后，由发射机以电信号发出，在信道中还要遇到起干扰作用的信号，导致信号畸变和失真，最后再经过纠码、译码而还原为原来的消息。由此可见，其中的信息是以多种具体的形式或

^① 维纳：《控制论》第二版，科学出版社1985年版，第8页。

形态存在着的，如消息、电信号、噪声等等。再就生物系统来说，存在着刺激信号、反应信号；对于高级神经活动来说，用巴甫洛夫的概念讲，有第一信号、第二信号等等。所有这些信号形式，都是信息这个一般概念的具体表现，正如机械能、热能、电能、化学能、生物能等都是能量这个一般概念的具体表现形式一样。所以，我们用由个别、特殊到一般的哲学观点来理解信息这个概念及其意义是并不困难的。

信息概念的形成，使我们能够将任意一个控制系统、控制论系统都看作是信息系统。从信息的观点看控制系统，上一节中的控制论系统框图就对应于下图所示的信息系统：

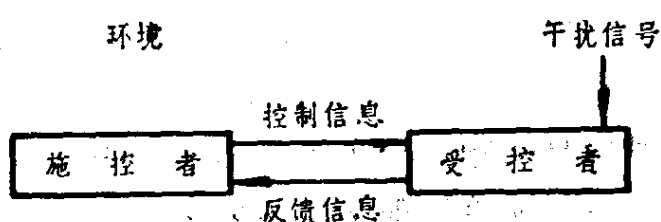


图2·16 作为信息系统的控制论系统

由左图，可以把施控者发出控制指令的信号看作信源发出的消息，而受控者发出的反馈信号看作经译码后所收到的消息。要使得所收到的消息与原来所发出的消息是一样的，就要抗干扰，也就是要对失真加以控制，这与一个系统因扰动而偏离目标必须加以控制是相似的。控制系统要有信息处理才能达到目的，而通讯系统要做到有效而可靠，也离不开控制。所以，这二者是很难加以区分的。

从这样一个基本观点出发，可以认为控制论所说的反馈，主要是从信息角度出发的。也就是说，控制论系统中的反馈主要是指信息反馈，至于反馈的具体形式或形态则是次要的。尽管技术装置中与生物有机体中的反馈回路可以很不相同，但作为信息通道来说，却是共同的。这样，就便于控制论从统一的角度来一般地研究各类不同的控制论系统，因而成为一种一般的控制理论。

由此也可看出，把控制论系统看作一种信息系统，更重要的一个原因是为了对控制论系统进行定量的研究。一般的控制理论

必须达到形式化、数量化的水平，而信息论是一门应用数学，它是统计数学与通讯理论相结合的产物。信息论的贡献，不仅在于提出了信息概念，更重要的是提出了信息量概念，对信息的规律进行了定量的处理。关于信息量的公式，我们将在下一篇中加以介绍。在此，我们只指出，控制论的一个特点是要求对控制论系统作定量的研究。既然任一控制论系统也可以看作是一个信息系统，而控制的机制又在于信息反馈的作用，因此，一个控制过程就可以作为一个信息过程而用信息论进行定量的处理。在这个意义上讲，信息论显然是控制论的重要理论基础之一。

以上就是信息与控制关系问题上的几个主要论点。因为我们现在还没有引入信息量和一些主要规律的数学表达式，所以只能作一些直观的说明。

除此以外，我们还要看到信息问题是一个涉及面很宽的重要问题。在科学技术方面，信息论与理论物理学、热力学以及统计物理学有密切的联系。维纳与布里渊 (L. Brillouin) 等人强调了信息量与负熵的关系，把信息论与统计力学联系了起来，并且还涉及到理论生物学以及现代的系统科学，因此成为当前科学理论研究中的重大课题之一，对此，我们将在以后陆续加以说明。

第四节 控制论机器与自动机

控制论在理论上把技术科学与生物科学结合起来，在技术上则要研制能模拟智能的技术装置。我们在前面将这种装置称为控制论机器，并已指出过，控制论机器与其它自动装置的一个重大区别就在于它是要对智能进行模拟。因此，它是与人工智能、仿生学、电子计算机密切联系在一起的。无论是由计算机进行控制的自动装置，或是模拟智能的计算机和自动装置，都可以看作是

控制论机器。这种在控制论的基本理论与方法指导下出现的控制论机器是现代高度自动化水平的重要技术基础之一。

为了从技术上实现控制论机器，必须在理论上研究这种机器的数学模型，也就是要研究一些不同种类的理想自动机。机器这个概念是一个历史的概念。随着社会生产的发展，机器不断改进，这个概念的内涵与外延也不断发展。控制论机器不同于以往的机器，主要在于它是从行为的角度来理解的，而不在于构成这些机器的质料与结构。所以，在控制论中，控制论机器这个概念是与行为概念联系在一起的。关于机器概念，是一个由控制论所提出的重要哲学问题，艾什比在其《控制论导论》、克劳斯在其《从哲学看控制论》中均有所论述，有兴趣的读者可去查阅。在此，我们不打算展开评述，但要指出的是，正是由于控制论以统一的行为观点来看待各类不同的自动机器，所以才能建立起一般的数学模型。所谓理想的自动机就是一种抽象的数学机器，是一种数学理论。可以说，控制论机器是以自动机理论作为其重要的基础理论的。

同时，还要指出，理想计算机也是一种信息处理的机器。在上一节中，我们引入了信息的概念，说明了信息与控制的关系。一个控制系统也是一个信息系统，一类控制论机器（主要是计算机）也是一类信息处理的机器。所以，我们一般是把计算机作为信息处理机来了解的。

现在的电子计算机分为两类，一类是模拟计算机，它的特点在于参与运算的量是用连续量表示的；另一类是数字计算机，它的特点在于参与运算的量是用离散量表示的。从计算机的发展来看，模拟计算机同数字计算机相比速度慢、精度低，并且不太通用，因此在计算机领域里占主要地位的是电子数字计算机，我们以后讲到的计算机，一般是指电子数字计算机。因此，自动机，特别是作为其主要代表的计算机，它所处理的量是离散的。而就

一个控制系统来说，一般处理的是连续的量，是用微分方程来表示的。只有在某些特殊情况下才将信号按时间间隔取样后再行控制，即所谓采样控制，这时人们处理的才是离散的量，用差分方程表示。就数学的进展来说，对离散量的研究要比对连续性量的研究落后。

上述分析说明了随着控制论、电子计算机的形成与进展，迫切需要一些新的数学理论，它们是以机器的行为，也就是以信息处理，特别是离散信息的处理为对象的。于是，在50年代开始形成自动机理论 (automata theory)。

以上从控制论、电子计算机的出现说明了自动机理论的形成与产生。自动机理论可以看作控制论的一个分支。但自动机理论的作用和意义并不限于此。在30多年的发展过程中，它不仅与数理逻辑和数学基础发生过密切的联系，而且它还吸收了一些古老的数学分支（如组合数学）以及现代数学（特别是近世代数）的成果，从而发展成为一门具有独立性的应用数学。

由此可知，自动机是一个数学概念，它是一类处理、加工离散信息的数学模型。虽然至今还没有关于自动机理论的公认定义，但我们可以把它理解为“研究离散数字动态系统的功能、结构及两者关系的数学理论”^①。这里所说的离散数字动态系统，就是取离散数值的信息处理系统，这种系统是一种动态系统。由于对这种系统的研究是从信息处理的角度出发的，所以并不要求事先弄清楚它的结构，而只需要从行为的角度，从外部弄清它的输入与输出间的关系，从而进一步由功能去探索结构。这在方法论上与控制论正是一致的。在这里不打算阐述自动机理论本身，只简单讨论自动机理论与控制论、控制论机器的关系。

首先要提到的是麦克卡洛和匹茨在1943年提出的神经网络理

① 陶仁骥：《自动机理论——一个年幼的数学分支》，1978年打印本。

论。关于这点在本书第一章已经提到过。早在30至40年代，申农等人就已经将数理逻辑中的命题演算和布尔代数运用于继电器结点电路的设计。由下图的简单例子我们可以看到，串联线路和并

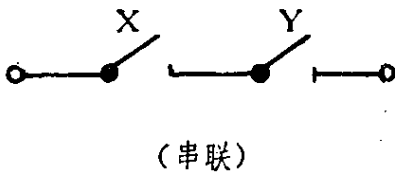
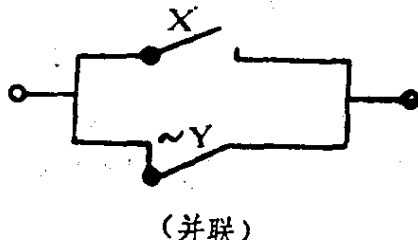
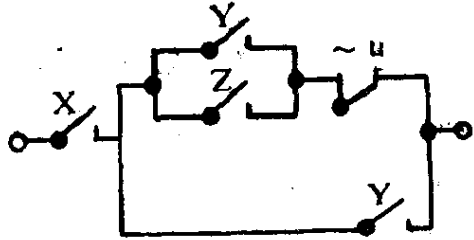
	电 子 线 路	逻辑表达式
(a)	 (串联)	$X \wedge Y$ (合取式)
(b)	 (并联)	$X \vee \sim Y$ (析取式)
(c)		$X \wedge (((Y \vee Z) \wedge \sim U) \vee Y)$

图2·17 电子线路与相应的逻辑表达式

联线路分别与合取式、析取式相对应，而一个复杂的电子线路是由串联和并联线路联结起来的，它也可以用相应的逻辑表达式来表示，如果将这种逻辑表达式用范式化简，就能从理论上找出最优的或较好的电路设计方案。

要看懂上图是不难的，只要稍有命题演算或布尔代数的基本知识就够了。我们这里不展开说明，请参阅有关的数理逻辑的教材或书籍。

再以图2·17(a)、(b)为例，开关X、Y各自可以是断开或接

通，分别使它们对应于 0 或 1。给出 X、Y 的不同值时，其合取式与析取式的真值表如下：

X	Y	$\sim Y$	$X \wedge Y$	$X \vee \sim Y$
0	0	1	0	1
0	1	0	0	0
1	0	1	0	1
1	1	0	1	1

图2·18 真 值 表

由图2·18所给出的真值表可以推出，只有当 X、Y 均接通时，其串联线路才接通；只有当 X 断开而 $\sim Y$ 接通($\sim Y$ 为断开)时，其并联线路才断开。显然，用同样的真值表方法，也可以推出 $X \wedge ((Y \vee Z) \wedge \sim U) \vee V$ 在哪些情况下为接通，哪些情况下为断开①。

用这种数学的、数理逻辑的方法处理简单的线路设计是有效的。但是，控制论机器、计算机之类的线路一般都是反馈线路，具有“记忆”的功能，尤其是对于生物系统中的某些比较复杂的线路来说，上述的方法就不够用了。麦克卡洛与匹茨工作的重大意义就在于找到了一套描述神经系统功能的数学和逻辑方法，并用这种方法将技术系统与生物系统进行了统一的处理。所以这一工作对于控制论、控制论机器的出现具有重大的意义。

现在我们用一种比较简明的叙述方式来介绍一下神经网络的基本概念。

神经系统的功能一般取决于神经系统的结构，神经系统由很多的神经细胞构成，可以看作是一种神经网络。每个神经细胞（也称神经元）由细胞体中的细胞核、包围在细胞外表的细胞膜

① 参看复旦大学数学系：《数理逻辑与控制论》，第一篇第二章，上海科学技术出版社1960年版。

以及填充在核与膜之间的细胞质这三部分构成。由此形成了一些关于生物电与生物化学的性质。在神经网络的研究中，为了简化，一般假设对这些性质加以忽略，而只考虑解剖的形态结构和某些最基本的神经生理规律（如“全或无”律），请注意下图所示的几个部分和过程。

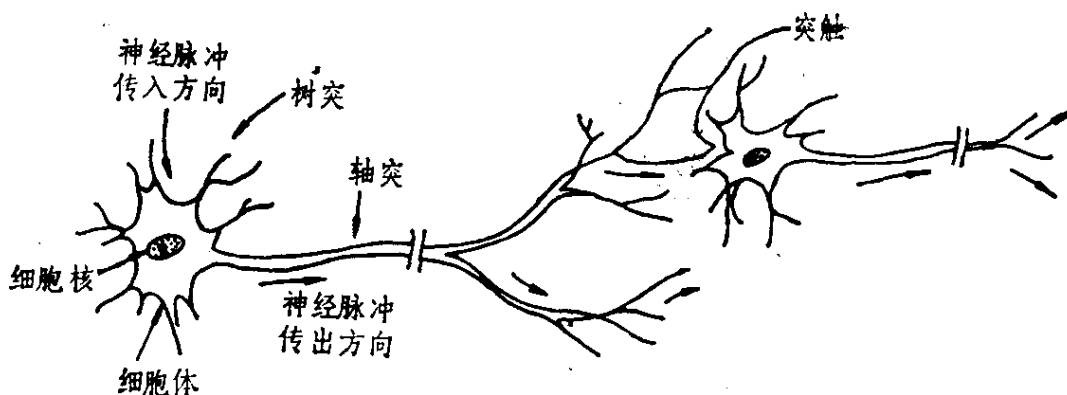


图2·19 神经元及其神经脉冲的传递

由上图，一个神经元，从解剖形态上看，主要是两部分，即神经细胞体与神经纤维。细胞体中有细胞核，其外围有很多细小的分支，称树突，其它神经元的神经脉冲一般通过树突传入神经细胞体，再经过轴突传到终端的很多神经末梢。这种神经纤维的末梢与下一细胞体的树突相接触的部分称为突触。经过突触，将前一神经元的神经脉冲传入下一个神经元。上图用两个神经元来表示其神经脉冲的传递过程。

现在我们用克林尼 (Kleene) ① 对麦克卡洛和匹茨的论文所作的改进来简要叙述神经网络的基本概念。

符号：“ ∇ ”表示神经元，“S”表示神经束，相当于神经纤维的末梢。神经束由神经元发出，与下一神经元相接触，其接触部位相当于突触。根据谢灵顿、巴甫洛夫等人的工作，在功能

① 克林尼：《神经网络和有限自动机中事件的表示》，载《自动机研究》，科学出版社1963年版，第1—56页。

上可区分为兴奋性神经末梢与抑制性神经末梢，分别在神经束的终段用根球“.”及“。”来表示。在“▽”中用数值表示神经元的阈值。若阈值为n,全部神经末梢的根球和必须大于或等于n（其中兴奋根球用正值表示，抑制根球用负值表示），则该神经元兴奋。下图分别表示几种神经网络：

名 称	示 意 图	逻辑表达式
合 取 神经网络		$P(t) \equiv J(t-1) \wedge K(t-1) \\ \wedge L(t-1) \wedge \sim [M(t-1)] \\ \wedge \sim [N(t-1)]$
析 取 神经网络		$P(t) \equiv L(t-1) \vee M(t-1) \vee \\ \vee N(t-1)$
时 滞 神经网络		$P(t) \equiv N(t-1) \\ Q(t) \equiv N(t-2)$
有 环 神经网络		$L_1(p) = p \leq 3 \\ (t = p, \dots, 1)$

图2·20 （图中t表示时间瞬刻）

在上表中，不仅有合取与析取的神经网络，而且有表示时滞、环路的神经网络，这样就能模拟简单的神经系统功能。例如，用神经网络模拟条件反射，这是在50年代就已经解决了的课题。由此而形成了脑模型的研究。脑模型的研究是智能模拟的主要分支之一，与生物控制论、神经控制论、仿生学等密切相关。

现在用冯·诺意曼所设计的模拟条件反射的神经网络作为例

子①。其结构如下图。

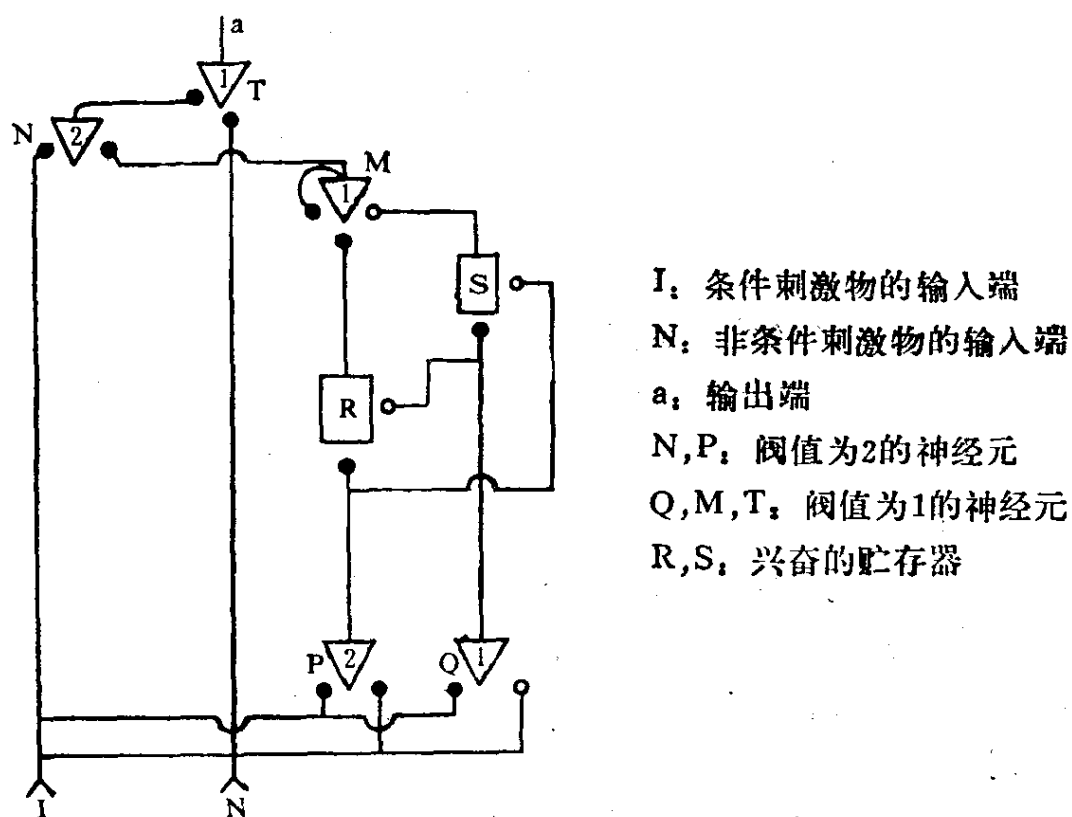


图2-21 模拟条件反射的神经网络结构图

在上述网络中，在不进行学习时，条件刺激物 I 不会引起反应，即 $a = 0$ 。若感受器 N 兴奋，会引起反应 a，说明非条件反射存在。为了形成条件反射，必须同时给出刺激 I 和 N，使 P 也兴奋，但 Q 不兴奋。这些脉冲总合到存贮器 R 中，R 起计数器的作用，只有当传入的脉冲总和数超过某值时才兴奋。当兴奋从 R 传送到带有反馈环路的神经元 M，M 因有环路而起“记忆器”的作用，故可将传入的兴奋贮存起来。在这种情况下，若条件刺激 I 兴奋，由于 N 已将此前的兴奋存贮在 M 中，所以也能产生反应 a。这样就对条件反射进行了模拟。

① 转引自 С.Н.Брайнес, А.В.Налалков, В.Б.Свечин, 《Неврокибернетика》，第二章。

从30、40年代的继电器结点线路设计的开关网络理论到50年代的神经网络理论，它们都是离散数字动态系统，并且其中有关的一些变量的取值都是有限的。于是在50到60年代间逐步形成了有限自动机理论（也称时序机理论）。神经网络就是其中的一种。

在上述对开关网络、神经网络的直观了解的基础上，现在给出有限自动机的严格数学定义^①：

设 X 、 Y 和 S 是三个非空有限集， δ 是笛卡儿积 $S \times X$ 到 S 的单值映射， λ 是 $S \times X$ 到 Y 的单值映射，则称系统 $\langle X, Y, S, \delta, \lambda \rangle$ 为一有限自动机。

记 $\langle X, Y, S, \delta, \lambda \rangle$ 为 M ，我们称：

X 为 M 的输入字母表，是由有限个输入字符 $x_1, x_2, \dots, x_n, \dots, x_r$ 所组成的集合（包括空字符 $\emptyset$ ）。在任一工作瞬间 t ，机器只能接受一个确定的 $x_i \in X$ 。

Y 为 M 的输出字母表，是由有限个输出字符 $y_1, y_2, \dots, y_1, \dots, y_r$ 所组成的集合（包括空字符 $\emptyset$ ）。在任一工作瞬间 t ，机器只能发出一个确定的输出字符 $y_i \in Y$ 。

S 为 M 的状态字母表，是由有限个内部状态 $s_1, s_2, \dots, s_1, \dots, s_n$ 所组成的集合（包括初始状态 S_0 ）。在任一工作瞬间 t_1 ，机器只能处于一个确定的内部状态 $s_i \in S$ 。

δ 为 M 的下一时刻状态函数。 δ 定义为 $S \times X \rightarrow S$ 的单值映射，表示在某一瞬间， M 的内部状态为 $s_i \in S$ ，输入字符 $x_i \in X$ ，则下一瞬间 M 的内部状态 $S_{i+1} \in S$ 。在此要注意，由于 δ 是一种单值映射，所以有限自动机 M 是一种确定型有限自动机^②。否则为不确定型有

① 陶仁骥：《有限自动机的可逆性》，科学出版社1979年版，第1页。

② 参看E.F.莫尔：《序列计算机的智力实验》，载《自动机研究》，科学出版社1963年版。

限自动机。

λ 为M的输出函数。 λ 定义为 $S \times X \rightarrow Y$ 的单值映射,表示在某一瞬间,机器的内部状态为 $S_i \in S$,输入字符为 $x_i \in X$,则输出为 $y_i \in Y$ 。

X, Y, S 中的元素分别为M的输入、输出和状态,用框图表示为:

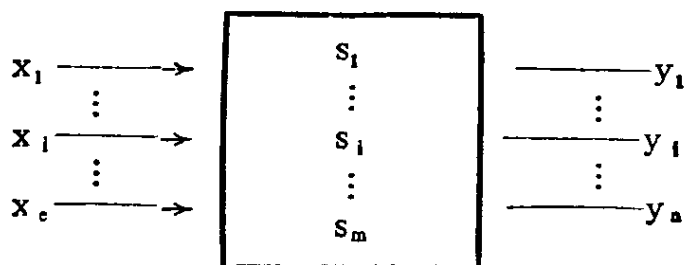


图2·22 有限自动机框图

再给出一个离散的时间坐标系统 $t_0, t_1, \dots$

记 t_i 时刻M的输入值为 x_i (或 $x(i)$),

记 t_i 时刻M的输出值为 y_i (或 $y(i)$),

记 t_i 时刻M的状态值为 S_i (或 $S(i)$),

$S (i = 0, 1, 2 \dots)$ 。

$s_{i+1} = \delta(s_i, x_i)$,

$y_i = \lambda(s_i, x_i), (i = 0, 1, 2 \dots)$ 。

这表示,在 t_i 瞬间,系统的输入值 X 和状态值 S 完全决定了 t_i 瞬间的输出值 Y_i 和 t_{i+1} 瞬间的状态值 S_{i+1} ,输出函数 λ 和状态函数 δ 起着算子的变换作用。这一特点称为同步工作方式。

由此可知,有限自动机具有下述的一些特点:第一,系统的输入、输出和内部状态只取有限种值;第二,时间坐标系统是离散的;第三,具有同步工作方式。这里所说的同步,从直观上说,可以理解为在同一瞬间,有一输入,就有一输出及相应的内部状态(在下一瞬间起作用)。如果我们直接用时间 t 和函数关系来表示,就更易理解:

$$s(t+1) = \delta(s(t), x(t))$$

$$y(t) = \lambda(s(t), x(t))$$

这不过就是说，在一有限自动机系统中，当 t 瞬刻有输入，在与其内部状态相互作用下，就给出输出，这就是同步作用。与此同时，在 t 瞬刻的输入与内部状态相互作用的结果，就会成为 $t+1$ 瞬刻的内部状态。

要理解上述的定义与特点，需要集合的基本知识，学过数理逻辑或微积分的读者是不难接受的。上述定义是在1964年由阿尔贝勃(M.A.Arbib)所给出的。要想有比较详细的了解，可参考他的原著第一章第三节^①。如果读者阅读有困难，可以省略，对理解下面的内容不致有大的影响。

自动机理论除包括有限自动机以外，还包括无限自动机(infinite automata)等。这里所说的无限，主要是指它的输入、输出等有关变量可以取无限值。这种自动机的一种典型种类就是图灵机。这是图灵于1936年在数学基础的研究中，为了给出“可计算性”、“算法”概念的严格定义而提出来的。

图灵最初给出的图灵机，是由五元组来定义的，就是说，与这种机器有关的集合和关系一共是五个，其每一个指令由五个符号组成，如 q, S, S, M, q ，其中 q 表示内部状态， S 表示输入， M 表示移动方式。现在，为了有助于读者的理解，我们用戴维斯(M.

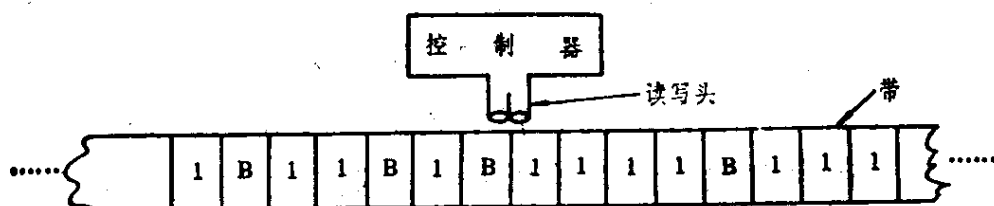


图2.23 图灵机示意图

① M.A.阿尔贝勃：《大脑、机器和数学》，商务印书馆1982年版，第12页。

Davis) 改进过的四元组的方法来说明图灵机的基本概念^①。

如上图所示, 图灵机是由 3 部分构成的: 1. 一条分成方格的带子, 这带子两端均是无限长的。这表明其输入变量可以是无限的, 故称无限自动机。2. 控制器。3. 由控制器所控制的读写头。带上的小方格中只能有两种符号, 0 (由 B 表示) 与 1。读写头是可以活动的, 读头可判别出小方格中记的是 0 还是 1, 写头则能在小方格中记上(或叫打印)一个 1 或是抹去一个 1 (可也抹去或写上一个 B)。读写头在某一瞬间只能对准一个小方格, 并能在控制器的操纵下沿带子向右移动或向左移动, 每次只能移动一格。

此外, 图灵机还要有一组由有限条指令组成的指令表。一种计算, 或一种算法由这组指令表来规定。这组指令表装在控制器内指挥着读写头的移动方向, 图灵机的工作过程就是执行其指令的过程。

在图灵机中, 符号 $q_1, q_2 \dots$ 表示内部布局 (internal configurations), 我们不妨粗略地理解为与内部状态相当。符号 $S_0, S_1, S_2 \dots$ 是字母表, 即机器所能打印的符号, 大体相当于输入或输出, 符号 R 和 L 分别表示右移一格与左移一格。由上述三种符号构成四元组。每一条指令都是一个四元组, 它作为一种最简单的图灵机时, 只能是下列三种形式中的一种:

1. $q_i \ S_j \ S_k \ q_e$
2. $q_i \ S_j \ L \ q_e$
3. $q_i \ S_j \ R \ q_e$

上面 3 种指令分别表示: 1. 当读写头注视的方格子中的符号为 S_j ; 而内部状态为 q_i 时, 则在方格中 (将 S 抹去) 打印上 S_k , 然后将内部状态转到 q_e ; 2. 当读写头注视的方格中的符号为 S_j ,

^① 参看 M. Davis, 《Computability and Unsolvability》, 1958, 第一章。

而内部状态为 q_1 ，则读写头向左移一格，内部状态转到 q_e ；3.与2.同，只是将读写头向右移一格。这里要注意的是，在一个指令表中，不能有两条指令其左端的两个符号是完全一样的。否则，这一指令就不确定了。

可见，一图灵机的主要动作有下列四种：

- 1.在注视方格上打印一个符号，（当然，在打印时也就把原来的符号抹去了）；
- 2.向左移动一格；
- 3.向右移动一格；
- 4.条件转移，指读写头注视的方格内若为某符号，则转向某一指令，否则，转向另一指令。

这样，一个图灵机实际上就是由指令构成的一个指令表，或者说是一个四元组的有穷（非空）集合，也就是一个算法。我们选用一个简单的例子来说明这点。

例：用图灵机进行 $3 + 2$ 的计算过程：

先给出作（非负整数）加法的指令表：

q_1 I B q_1	(1)
q_1 B R q_2	(2)
q_2 I R q_2	(3)
q_2 B I q_3	(4)
q_3 I R q_3	(5)
q_3 B L q_4	(6)
q_4 I B q_4	(7)

现用上列指令表（共7条）来计算 $3 + 2$ 。

将计算步骤列图如下：

这是进行 $3 + 2$ 计算的初始状态。在带上的B或1是S的两种可能记法。非负整数 n 用 $n + 1$ 个1来表示，如上带中的3用4条1来表示，2则用3条1来表示。

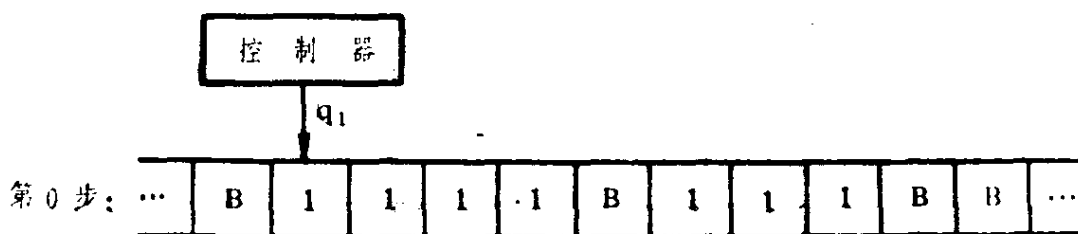


图2·24 图灵机计算过程示意图 (1)

这时，读写头指1，而内部状态为 q_1 ，由(1)，要将方格内改为B，内部状态仍为 q_1 ，如第一步所示。

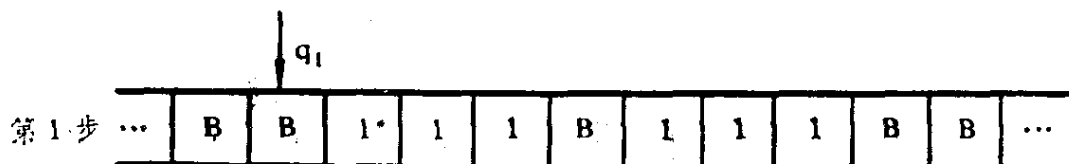


图2·24 图灵机计算过程示意图 (2)

这时，读写头指B，内部状态为 q_1 ，由(2)，读写头向右移一格，内部状态转为 q_2 ，即第2步。以下均按此进行，不再逐步解释。

由上例使我们对图灵机如何进行计算的问题有了一个直观的了解。这表明，如果给定一组指令表，我们就能按照其指令的要求，一步一步机械地得到计算的结果。在上例中是经过12步，才得到6个1，即 $3 + 2 = 5$ 的。

通过上述的简略介绍，我们就可以理解为什么说图灵机是为了解决可计算性这个问题的。图灵机作为一种无限自动机是自动机理论的一部分，而就其历史渊源与现在的进展来说，又是可计算性理论的一部分。这也反映出当前学科相互渗透的趋势。

可计算性理论是数理逻辑与数学基础的一个分支，而现在又

① 转引自陶仁骥：《自动机理论——一个年幼的数学分支》，1978年打印本。

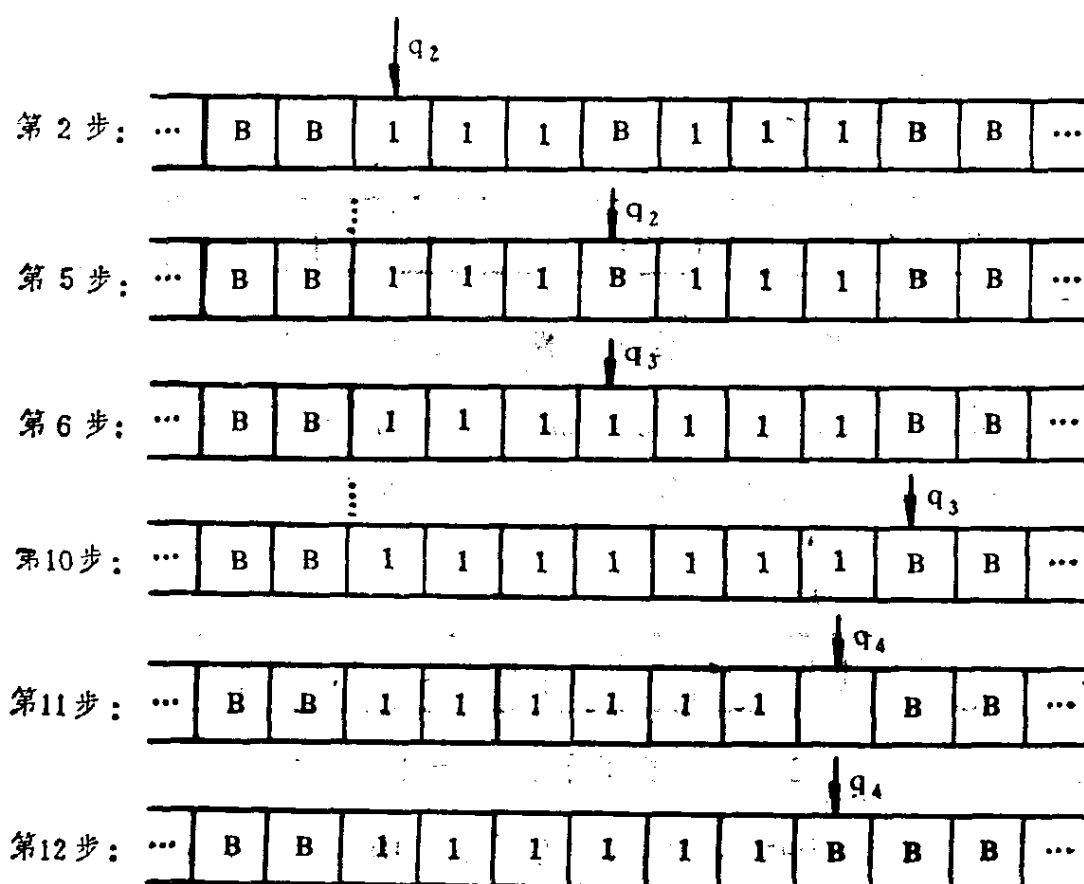


图2.24 图灵机计算过程示意图 (3)

是计算机科学的重要基础理论之一。

可计算性理论是在30年代初期为了解决数学基础问题而发展起来的。1931年，哥德尔 (K. Gödel) 在其著名论文《〈数学原理〉及有关系统中的形式不可判定命题》^①中提出了著名的不完全性定理。为了给出这个定理的证明，使用了递归函数 (recursive function) 概念，并给出了这个概念的严格定义 (以后的研究表明，他实际上给出的是原始递归函数的定义)。

递归函数是一种数论函数，就是说，这种函数是取0, 1, 2, ……这些整数值的，它本来是数学中使用的一种函数。在1923年，斯

^① Monatsche für Mathematic und physik, vol, 38, PP.173—198。

柯林 (T. Skolem) 就利用它研究过初等数论。到30年代, 又由哥德尔用于数学基础的研究, 由此逐渐发展成为一门独立的分支——递归函数论。半个世纪以来, 它的主要内容已包括原始递归函数、一般递归函数、部分递归函数、递归可枚举性、判定问题、递归不可解理论、 α 递归论, 谱系理论等。

要了解递归函数的基本概念并不困难。在数学中常常用到一些递归式, 借助这种递归式, 一些复杂的运算可以还原为一些简单的运算, 从而求出结果。递归函数的概念就是在此基础上形成和发展起来的。数学中的“斐波那奇”函数(Fibonacci function)就是一个简单的例子^①。

$$\begin{cases} f(0) = 1 \\ f(1) = 1 \\ f(y^+) = f(y) + f(y-1) \quad \text{当 } y \geq 1 \end{cases}$$

其中 y^+ 表示 y 的后继数。取 $y = 2$, 则 $y^+ = 3$, 代入上式为 $f(3) = f(2) + f(1)$, 显然, $f(3)$ 可以简化为 $f(2)$ 与 $f(1)$ 的计算:

$$\begin{aligned} f(3) &= f(2) + f(1) \\ &= \{ f(1) + f(0) \} + f(1) \\ &= \{ 1 + 1 \} + 1 = 3 \end{aligned}$$

同样可求得 $f(4) = 5$, $f(5) = 8 \dots$ 等等。由此可知, 任给一自然数 n , 总可以用上列的递归式一步一步地求得 $f(n)$ 的值。如果把这类递归式理解为一种算法, 那么, 我们所要求的结果, 就能用这种算法一步一步机械地做出来。这样一种计算过程是机械地进行的, 也称为能行过程, 递归函数论有时也称为能行性理论, 或能行可计算理论。因此, 递归函数论也是一种算法理论, 它具有机械性或能行性的特点。

现在我们给出原始递归函数与一般递归函数的一种定义, 数

① F. Hennie, Introduction to Computability, 1977, P. 189.

学与数理逻辑知识不够的读者可以省略掉这部分。

定义 1：由常数 0，变数 $x, y, z, \dots$ ，函数 $x+1$ 出发（称这些为初始函数），经过有限次的代入与原始递归式：

$$\begin{aligned} & \varphi(0, x_1, x_2, \dots, x_r) \\ &= \alpha(x_1, x_2, \dots, x_r) \\ & \varphi(y+1, x_1, \dots, x_r) \\ &= \beta(y, x_1, \dots, x_r, \varphi(y, x_1, \dots, x_r)) \end{aligned}$$

而定义的函数为原始递归函数，其中 r 元函数 $\alpha(x_1, \dots, x_r)$ 及 $r+2$ 元函数 $\beta(y, x_1, \dots, x_r, x_{r+1})$ 为已知函数。

这个定义是比较抽象的，可以用一些例子来验证。常见的数论函数，如加、减（算术减）、乘、除（算术除）、乘方、最大公约数、最小公倍数等都是原始递归函数。它的应用是广泛的。后来，阿克曼 (Ackermann) 在 1928 年发现了不是原始递归函数的阿克曼函数。于是，原始递归函数向一般递归函数的概念发展。一切原始递归函数都是一般递归函数，反之不然。如阿克曼函数一般是递归函数而不是原始递归函数。现给出一般递归函数的定义。

定义 2：从初始函数 0 及 $x+1$ 出发，经重复地代入并使用原始递归式：

$$\begin{aligned} & \varphi(0, x_1, \dots, x_n) \\ &= \alpha(x_1, \dots, x_n) \\ & \varphi(y+1, x_1, \dots, x_n) \\ &= \beta(y, x_1, \dots, x_n, \varphi(y, x_1, \dots, x_n)) \end{aligned}$$

（其中 α, β 为已知函数）以及下式的 μ -定义模式

$$\begin{aligned} & \varphi(x_1, \dots, x_n) \\ &= \mu y \{ A(x_1, \dots, x_n, y) = 0 \} \end{aligned}$$

而构成的函数称为一般递归函数，其中 A 为已知函数。且要求 μ -定义模式对任意的 $x_1, \dots, x_n$ 都存在着 y 使得 $A(x_1, \dots, x_n, y)$

$= 0$ ，而 $\mu y \{ A(x_1, \dots, x_n, y) = 0 \}$ 乃指这种 y 中的最小值。这个 μ -定义模式也可称为一种摹状式，它是一种运算，故又称 μ -运算。一般递归函数可以理解为在原始递归函数的定义中加进上述摹状式而得到的。

由上述的例子和定义，我们可以把递归函数直观地理解为可以通过某种“回归”，将未知归结为已知的一种函数。

在可计算性理论的研究方面，除了递归函数论以外，在1933到1935年期间，丘奇 (A. Church) 与克林尼 (S. C. Kleene) 又提出了 λ -转换演算，并在1935年初证明了一般递归与 λ -可定义性是相互等价的。以此为根据，丘奇在1936年发表了著名的丘奇论题 (Church's thesis)：任一可计算函数是一般递归函数或 λ -可定义函数。这个论题无法证明。但由于至今没有找到反例，所以它仍为绝大多数数学家与逻辑学家所接受。

此后不久，图灵就提出了图灵机器，从另一个角度给出了可计算性的严格定义。在这种定义中，图灵给出的不是一种函数，而是一种指令表，以此来说明能行可计算性。就是说，这种理想计算机可以用来计算全部的可计算函数。图灵也证明了图灵机器与 λ -转换演算以及一般递归函数的等价性。

除了上述工作以外，在可计算性的研究方面，还应提出波斯特 (E. L. Post) 的产生式系统。这是以另一种方式提出的可计算性理论。它是一种符号处理系统，只有推导规则（称为产生式），用以由一串符号推导出另一串符号。它与自然推理系统相类似，在现代的计算机科学中有重要的应用。波斯特早在20年代就研究过这种系统，但正式提出是在1943年。

上述这些能行性理论所提出的算法 (algorithm) 与能行性 (effective) 的概念同控制论与控制论机器有密切关系。

算法是一个古老的数学概念。对于一个数学问题，如果我们找到一个解这个问题的方法，使得这个问题是可解的，那末，这

个方法就是一种解法。对一个一个的问题，解法往往是不同的，并且同一个问题有时还可能有不同的解法。这种解法虽然是有用的，但没有通用性。人们在实践中逐步认识到，可以找到一些具有通用性的解法，它们不是对于某个具体问题而言，而是对于某类问题都适用。这种解法就具有了算法的特点。作为一个古老的例子，就是求最大公因数的欧几里得算法：

若 a 和 b 为正整数， $a > b$ ，且

$$\begin{aligned} a &= bg + r & 0 \leq r < b \\ b &= rg_1 + r_1 & 0 \leq r_1 < r \\ r &= r_1g_2 + r_2 & 0 \leq r_2 < r_1 \\ &\vdots & \vdots \\ r_{k-1} &= r_k g_{k+1} + r_{k+1} & 0 \leq r_{k+1} < r_k \end{aligned}$$

则对足够大的 k ，如 $k=t$ ，我们有

$$r_{t-1} = r_t q_{t+1}$$

则 $(a, b) = r_t$ 。 r_t 即为 a 与 b 的最大公因数。对任意正整数 a, b ，我们总可以用这种方法，求得它们的最大公因数。

当然，这种算法还是很初始的，具有直观的性质。以后，在几何这个被人们看来解题比较困难的领域，由于笛卡尔引入了坐标概念，建立了解析几何，人们又找到了许多关于几何问题的算法。正如王浩所说，“高一级的抽象可以给高等数学强加一些秩序和一致性：算术中的技巧问题在代数中变成了机械的内容，在初等几何中的证明在解析几何中变成了有规则的。”^①

人们在数学的不断发展中，在不同的数学分支中发现了越来越多的算法。但是，人们也遇到了一类问题，找来找去找不到其相应的算法。于是人们产生一个疑问：是这些问题根本没有算法

① H. Wang: 《From Mathematics to philosophy》，P.282.

呢？还是有，因条件不够没能找到？进一步又有一个问题：有没有方法能判定一类问题有无算法呢？这就是判定问题（decision problem），或能行可判定问题。它与算法问题是密切相关、难以分开的问题。

数学史上有一个典型例子。1621年，数学家费尔马买了一本丢番图（Diophantus）著的《算术学》的法文译本，他在书页的空白处写道： $x^2 + y^2 = z^2$ 有无穷多组整数解，而 $x^n + y^n = z^n$ ，当 $n > 2$ 时，则永无整数解。对此至今未能证明。由这个费尔马大定理可以引出一个判定问题，即对任意 $n \geq 2$ ，有无一算法能判定 $x^n + y^n = z^n$ 有整数解，把它推广到一般形式，就是希尔伯特第十问题，即有无一算法能判定任一整系数多项式有整数解。直到1970年，才由四名数学家（Davis-Putnam-Robinson-Matijasevič）证明了这个问题是不可解的。到1976年就有人提出了丢番图机器理论，也称为D-机器，与图灵机器相比，它是一种不确定型的机器，更接近于人的思维活动的特点。

由此可知，一类问题的能行性问题，就是指它的判定问题。而判定问题的关键就是要确定一类问题有无算法。算法在计算机科学中就体现为程序问题。这就是这些概念的内在联系。说得明确些，一类问题A是能行可判定的，是指存在着一定的算法，运用这种算法，就可以在有限步内有效地判定这类问题中所预先给定的命题是真还是假。所以问题A的能行性问题，就是给A找算法的问题。所谓算法，从直观上说，就是指对于某一类问题，我们能够找到一组规则，运用这组规则，可以机械地在有限步内得到结果。上述的递归函数、图灵机器等则是给出了算法的精确数学定义。与此相联系，自动机理论要解决的也是算法与能行性问题。

并不是任意一类问题都是有算法的。1931年，哥德尔提出的不完全性定理有两种表述形式：

1. 一个初等数论的形式系统P，如果是 ω -无矛盾的，那么它

就是不完全的（也就是说在这系统中不能推出全部为真的命题）。这是第一不完全性定理。（关于 ω -无矛盾的含义，请参阅专书。）

2. 如果这一系统是无矛盾的，那么其无矛盾性在本系统中不可证。这是第二不完全性定理。

这就是说，他证明了即使是初等数论的命题类也是不可判定的。这个结论很重要，它指出了在整个数学中企求寻找一个算法的想法是没有现实意义的。因为像初等数论这样比较简单的数学系统，也是找不到统一的算法的。这个定理有重大的理论意义，后来又涉及到机器与思维之间的争论问题。关于这点，我们在人工智能的哲学问题中再加以论述。

递归函数论、图灵机器理论等所研究的均限于理论上的能行可计算性（effective calculability）。随着计算机科学的发展，人们越来越认识到，理论上可计算的并不等于在实际中是可计算的。这是因为计算机是要受到时间限制的。如果某类问题是能行可计算的，但计算步骤却是按幂指数增长，那么，即使计算机的运算速度很快，也是无法在短期内得出结果的。因此，在60年代以后，人们提出了现实可计算（feasible computation）的概念，研究一类问题是否在实际上可计算，进而形成了算法分析或算法复杂性理论。这是可计算性理论与计算机科学相互渗透的产物。

在阐明了能行性与算法概念以后，我们再回到所要讨论的问题上来，那么控制论、控制论机器与自动机理论、可计算性理论的关系就更清楚了。控制论要把技术科学与生物科学用行为、信息、反馈等概念统一起来，并要研制出具有智能模拟功能的控制论机器，首先就要找出能对它们进行统一处理的形式化语言，特别是数学与逻辑的语言。然后，控制论机器的实现问题也就在实质上成为解决能行性、找出算法或程序的问题。因此，我们认为算法与能行性也是控制论的基本概念。并且，它也必然涉及到现

实可计算的问题。

王浩曾讲过，“30年代以来逻辑的一个巨大成就就是成功地提出了关于机械过程（能行过程、可计算性、算法、有穷方法）的有兴趣的认识论概念的一个绝对的（即不依赖于所选择的具体系统的）定义。事实上，可以说这是我们能相当完满地给以阐明的涉及数学的唯一的基本的认识论概念。”^①可见，能行性与算法的概念，不仅是逻辑的、数学的概念，而且也是一些具有重要认识论意义的哲学概念。当控制论、控制论机器涉及到这些概念时，也必将会引起一系列的理论问题与哲学问题。对此，我们在第五章中再作讨论。

① 王浩：《数理逻辑通俗讲话》，科学出版社版，第196页。

第三章 控制论的一些主要方法

控制论的形成与创立是与方法论的研究分不开的。譬如，类比方法在控制论的形成与创立过程中就起过关键性的作用，正是类比方法沟通了机器、生命体和社会等性质不同的系统，找到了它们的相似性，为功能模拟方法的运用提供了逻辑基础。由于类比，控制论可以用一种物质运动过程来代替本来由另一种物质运动过程所负担的某些功能。又如，统计学的方法也在控制论的产生过程中起过重要作用，维纳对控制论的最早兴趣就是从研究随机问题开始的。他从1919年起就开始研究随机问题，首先研究布朗运动这一种随机物理现象，以后转向更一般的随机过程。在这一研究过程中，他逐步认识到统计学的方法是分析、认识世界的一种重要方法，这一思想对产生控制论起了很大的作用。另外，还有行为主义方法、系统方法等等，都或隐或显地影响着控制论的产生和以后的发展方向。可以说，控制论是不同学科的理论和方法移植和渗透的结果。但不能简单地说上述方法就是控制论的方法。许多促使控制论产生的方法在控制论产生的过程中具体化、科学化、精确化，而区别于自己以前的形态，带上了控制论的特点。此外，控制论的理论本身也提供了相应的一些方法。控制论所涉及的方法论问题是很多的。可以说，控制论是一门具有方法论特点的学科。无论就其科学研究的战略思想，还是比较具体的科研方法，控制论都给予人们以许多重要的方法论启示。我们在这里仅仅论述一些与控制论理论密切相关的方法，并力图说明它们对一般方法论问题的影响。这是我们在论述了控制论的基

本理论以后所要弄清楚的问题。因为理论与方法是紧密联系着的。

虽然如此，对于什么是控制论方法，它应该包括那些主要内容，至今还不是很明确的。由于控制论的理论与应用涉及的方法论问题很广泛，见解也很不一致，因此，我们只能选择一些比较一致的看法加以论述，而把一些有关的讨论问题放到哲学与方法论问题中去加以评述。

第一节 功能模拟方法

随着近代科学的发展，愈来愈多的事物进入人们认识和研究领域，成为科学的研究对象。这些认识客体具有各种各样的特点。有的客体在空间上或时间上极为遥远；有的客体由于范围太大或太小，或者它存在和发展的延续时间很长或很短，以至难以被直接观察到；有的客体由于其物理属性，直接实验不可能；有的由于其价值昂贵，直接试验经济上代价过高；有的由于过分复杂和特殊，不可能直接进行试验；另外，研究对象如果是人的话，直接实验所受的局限就更多了，如此等等。认识客体的特点，再加上人类各种认识条件的限制就迫使人们必须用模型实验来代替真实的研究客体，也就是采用模拟的方法。

要搞清什么是模拟方法，先要弄清楚模型这个概念。一个模型也是一个系统，它可以是想象的，可以是现实存在的，也可以是自然的。我们之所以可以把它称为模型，是就它同另一个系统（我们称之为原型）有如下三种关系而言，换句话说，一个系统称为模型，必须满足下列三个条件：（1）模型与原型之间具有相似的关系，我们称之为类比性；（2）模型在具体的研究过程中要能代替原型，这称之为代表性；（3）通过对模型的研究，能

够得到关于原型的信息，这称之为外推性。这三个条件正反映了模型方法的三个特点，即相似性、代表性和外推性，这就把模型方法同其他的科学方法区别开来了。根据代表原型的方式和形式的不同，模型大体上可以分为两类：一类是实体模型；一类是形象或符号模型，也有人称之为理想模型。

模拟方法是控制论中的主要方法之一。控制论的模拟方法同一般的模型方法相比具有什么特点呢？

首先，控制论的模拟方法在内容上最显著的特点在于它是功能的模拟。前面已经讲过，行为主义心理学的方法曾对控制论的产生有过影响，控制论重新规定了行为这一概念的内涵，并把它作为自己的基本概念，这一概念在沟通工程技术领域和生物领域中起了很大的作用。可以说，功能模拟方法正是行为这一基本概念在方法论中的体现。在对于模型这一概念的认识中，人们对模型的相似性的理解越来越深入，也越来越广泛，相似性可以是纯粹外表的，可以是内部结构的，也可以是行为的某些一般性质。控制论感兴趣的是能够同周围环境保持稳定与合理的相互关系的相当复杂系统的行为规律性。从控制论观点看来，在两个系统之间导致原型—模型关系的最重要的相似性是行为上的相似性，它不仅撇开了组成控制论系统的元素的不同本质，而且还撇开了这些元素彼此用以相互联结的具体方式。例如对于信息，控制论不研究它采取什么样的具体方式，不研究它的物质载体具有什么性质，不研究它的能量特征，它只把视野集中于信息在控制和自组织系统中所发挥的功能这一点上。可以说，功能模拟方法反映了控制论这一学科的特点和抽象化水平。功能模拟主要模拟的是行为特征，因此控制论模型一定是也只能是一种变化的、运动的模型。

其次，控制论的功能模型之所以能建立，其中隐含着这样一个思想：在一定条件下，在形式、结构不同的系统中，可以观察

到同样的行为。但控制论又不满足和停留在行为的相似性上，它总想从模型的行为得出关于客体结构的知识。这里就可能产生一个矛盾：不同的结构可以有相似或相同的功能，而从这些相同的功能中又如何确定它们各自的结构特点呢？控制论不同意只有认识了结构才能认识功能这种简单的认识方法，但它在研究中又不排除功能同保证这些功能的结构之间有内在联系，它要研究的是一种更为复杂和细致的功能与结构之间的关系。克劳斯曾指出，在评价控制论模拟时，极为重要的是要正确地、也就是辩证地解决结构与功能的统一性问题。关于这个问题，我们在以后将展开论述。这里，我们仅强调一点，功能模拟方法是建立在对结构与功能关系的认识基础之上的，并且在控制论的实际发展和对问题的实际研究中，它从来没有完全撇开结构谈功能。例如，控制论正是在研究不同系统中共同的控制和调节的功能时，发现了信息反馈通道的存在，指出它是执行控制和调节功能必要的结构条件。这说明，在某种情况下，从功能出发比从结构出发更能发现关于结构的知识。

功能模拟方法在控制论中发挥了很大的作用。它不仅发挥了一般模拟方法的功用，即展现出与原型的行为相似的行为，在对模型的行为和结构进行研究的基础上，可以揭示出新的还不知道的原型的特点和属性。并且，要特别强调的是，控制论所模拟的是有目的性的行为。这样，模型本身也可以具有独立地被研究的特点。例如：人工智能研究机器用怎样的手段和方式可以代替人的智力的功能。在这里，模型不再仅仅是一种研究原型的手段，它本身就是研究的目的。这类问题的解决本身就具有很大的科学和实践意义。这表明模型的代表性这个特点在一定程度上可以发展为一种代替性。

第二节 黑箱—灰箱—白箱方法

功能模拟的方法一般是因为不认识或不完全认识所研究客体的结构才从功能研究着手的。这种方法实际上把研究客体作为一种黑箱。因此，功能模拟方法与黑箱方法是密切相关的，也可以说前者是从后者出发的。

1956年，艾什比在其所写的《控制论导论》中对黑箱方法作了比较系统的阐述。

首先他明确了什么是黑箱问题以及黑箱问题的普遍性。他认为：“黑箱问题是在电机工程中出现的。给电机师一个密封箱，上面有些输入接头，可以随意通上多少电压、电击或任何别的干扰；此外有些输出接头，可以借此作他所能作的观察。”^①他进一步指出黑箱问题在各门科学中都是普遍存在的。在医学中，医生是靠诊察、化验和问答来推断机体的病情；在神经生理学中，人们是通过观察动物的刺激和反应来推断其内部神经结构的。他认为，实际上，黑箱问题在日常生活中是广泛存在着的。如一个人在不会开门时，总是在门把手上左右转动（输入），看门闩开不开（输出），而不必把门锁卸下来，了解其中的构造。可以说，我们从小到老都在跟黑箱打交道。许多事物我们自以为不是黑箱，但它们实际上仍是黑箱。艾什比举了一个关于自行车的例子：“我们可能起初会设想自行车不是个黑箱，因为连成它的每个部件我们都能看出来。事实上我们只是自以为知。踏板与轮子的最初联系在于把金属原子聚在一起的那些原子力；而这些原子力我们一点也没有看见。而骑车子的孩子，只要知道踏踏板能使

① 艾什比：《控制论导论》，科学出版社1965年版，第86页。

车轮转动就够了。”^①

从艾什比的论述中，我们可以清楚地看到这样几点：首先，所谓黑箱是指这样一个系统，我们只能得到它的输入值和输出值，而不知道其内部结构。黑箱可以是任何系统，只要是仅根据对其外部性质的研究来对它进行判断的系统。其次，黑箱问题实际是个认识论问题。所谓黑箱，是相对于人这个认识主体而言的。在这个研究领域里，客观事物无所谓“黑”“白”之分，而人的认识却有一个不知与知、知之不多与知之较多的问题，对某个事物有了确定的知识，“黑”就转化为“白”。由于它是个认识论问题，由人的认识的相对性也就推出黑箱问题的相对性。

艾什比认为，控制论的贡献不在于把这样一类我们对其一无所知的系统称之为“黑箱”，而在于它提供了一种认识这种“黑箱”的方法，也就是它研究了如何从黑箱得到信息、这些信息又能说明什么的问题。下面就详细介绍一下艾什比所论述的黑箱方法的具体内容和实施的具体步骤。

1. 先对箱子的性质和内容不作任何假定。但我们假定处理它的人有一些对付它的东西（比方说用杆去敲敲它，用手电去照照它），还有一些观察它的手段（比方说用照相机把它照下来，用温度计计量它的温度）。这样对箱子进行工作，让箱子对他和他的记录仪器作出反应，人就跟箱子耦合起来，两者形成了一个有反馈的机器：

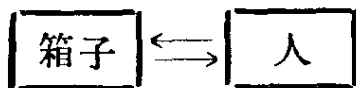


图3·1 人与黑箱的耦合系统

黑箱方法就是研究这个耦合系统的。艾什比认为：“黑箱理论无非是研究观察者与其环境之间的关系的理论。”^② 这是很值得注

① 艾什比：《控制论导论》，第110页。

② 同上，第111页。

意的一点，不仅被观察者是研究对象，而且观察者与被观察者的关系也是研究的对象。

2.为使耦合是以确定而又可重现的方式形成，就必须规定箱子的“输入”，那怕这种规定是任意的或暂时的也行。因为现实的系统有可能有无穷多种输入（即试验者用以影响箱子的可能方法），同样，它也可能有无穷多种的输出。但是如果要进行系统的观察，那就必须决定所用的一组输入与所要观测的输出是什么。这一步骤正反映了人在认识过程中的能动性和目的性。我们不是消极被动地对一个纯自然的系统进行观测。实际上，毫无目的的认识在现实的认识过程中也是不存在的。在实际的研究中，对输入和输出不仅有内容的规定，并且必须把这种规定数量化和形式化。艾什比认为不妨作这样两个无关大体的规定：假设不管输入的实际性质如何，用一组拉杆和指针来代替或代表它们，这样输入“在某一状态”这话的意思就很清楚，它就是指旋钮和度盘的位置；再假设输出是箱上的一组度盘，受箱内机构的影响，各度盘指针在某一时刻的位置，就是输出的某一状态。这种数量化的规定表面上似乎离自然系统越来越远，实际上正是这种抽象化才正确地反映了大多数的自然系统和黑箱方法的真正本质。

3.采用一个长篇登记表，记下输入和输出的一系列状态：

时 间	输 入 及 输 出 状 态	
↓ ...	...	...
...	...	...

对黑箱作任何研究的原始依据，总是一串含两个分量（输入、输出）的矢量值。

4.找标准表达式。有了很长的登记表以后，试验者就可以从中找规律，即找性态有无重复出现的情况，由此写出其标准表达式。这个标准表达式是由直接观察黑箱的实际性态推出来的，不

管试验者所希望得出的是什么，也不管他对所希望得出的东西有多大的信心，最后推得的结果，只取决于实际发生的情况。

5. 推导联系。用推导方法得出黑箱的一些内部联系。

以上这五个步骤乃是抽象化和简单化了的，这种简单和抽象是为了让人们把握黑箱方法的主要之点。在现实的黑箱方法的运用中，情况比这要复杂得多。艾什比列举了许多复杂情形的处理方法。如输入与输出的关系不是单值可以确定的，这就必须采用更为复杂一些的方法。一种方法是不断改变输入，多考虑一些变量，从中发现输入与输出的确定关系；一种是不找严格的确定性而去找统计确定性。又如，在试验过程中，还会出现某些特殊的状态。例如有这样一种状态，它在登记表里出现一次以后，不管你怎样调试输入，都不能让它再出现，因此从这个状态开始的转移就不能再往下探索，也不能一再重复试验。艾什比也给出了解决这种情况的具体办法。

在这里需要认真讨论的是由标准表达式到内部联系图的推导。这实际上就是功能模拟中所涉及的功能、结构问题。对于同一个黑箱，由于其输入和输出不同，可以得出不同的标准表达式；另一方面，给出相同标准表达式的甚至可能有无穷多的内部结构。申农曾证明任何指定的状态可由无穷多个可能的网络产生。艾什比也明确指出：“性态不能唯一地决定联系。”^①在这种对功能、结构关系认识的基础上，艾什比深入讨论了同构型机器和同态型机器的问题。

所谓同构型机器是指：两个机器的标准表达式，如果存在一一变换，能将一个机器的状态（输入与输出）变为另一机器的状态，而同时把一种表示式转变为另一种表示式，则说它们是同构的。同构的定义规定了一种很严格的等价性，当把同构的两个

① 艾什比：《控制论导论》，第93页。

机器混在一起后，人们单从测试性态这一点上是不能把它们区别开来的。同态型机器对等价性的要求比同构性机器要弱得多：如果两部机器之间有这么一种关系，在我们找到一种合适的多一变换，对其中一机器施行该变换后，则那另一台机器便是第一个机器的同态象，即这二台机器是同态的，存在着一种隐含的相似性。

有了以上认识一个黑箱的主要步骤以及同构和同态的概念，对模型的意义和建立模型的方法就可以了解得更明确了。所谓建立模型，也就是给出原型的同构象或同态象。“同构系统”和“同态系统”具有很大的实用价值，因为大多数系统都有其方便与不方便之处，当测试某一系统而又遇到不便之处时，若能找到它的同构系统或同态系统，就可能发现同构或同态系统的对应之处，这样就便于理解和研究了。经验告诉科学工作者，有能力把问题化为同构或同态系统的问题，虽然还不足以给出绝对可靠的结果，但毕竟提供了一种有用而又实际的帮助。如果能找到一个系统的同构象，问题当然更精确，但这个目标不一定能实现，即便实现了也不一定最好。实际上，更重要和更常用的是同态象的概念。例如，模型与生物系统很少是同构的，一般说来，生物模型顶多是生物系统的同态象。因为生物系统太复杂了，只有把它们大大简化，才能使研究工作切实可行。至今还没有任何一种生物系统是按照它本身的复杂面貌而被研究的，而且在以后很长一段时间内也很难如此。艾什比认为：“在研究生物方面的系统时，我们就有理由，而且也不得存心不把所有可能分辨的状态都分辨清楚，而且存心地把一个能动系统换成它的同态系统而只研究后者。”^① 艾什比在这里引伸和发挥了一个重要的思想，他认为，以前，“我们常假定研究者知道系统每时每刻究竟处于什么

① 艾什比：《控制论导论》，第106页。

状态。换言之，我们假定他在每时每刻对系统的状态是完全掌握了。但若研究的系统愈来愈大，那末总会大到这么一个阶段，以致仅仅由于系统状态的数量过多这一点，就使他不可能接受关于系统状态的所有情况。或者是传递通道不能传递所有的信息，或者是研究者接到了所有这些信息后弄得手足无措。如果发生这种情形，他该怎么办？回答是清楚的，他必须把要掌握整个系统的雄心打消。他的目的必须限于得到一种部分的了解，这一部分的知识虽不能包括整个系统，但其本身是完整的，而且足够用来达到他最后所需要的实用目的”^①。艾什比在这里指出了简化系统和科学家适当运用部分真理的必要性和可能性。“用科学方法来研究复杂的系统，并不要求把每一种可能分辨的状态都分辨清楚。”^②但是，“在研究这样一个系统时，研究者说到这‘系统’时必须审慎，因这话的意义可能相当含糊，甚至可能非常含糊。所谓‘这系统’可能是指该系统本身而不管研究者是怎样去认识它的，也可能指的是某种研究者所关心的一组变量（状态）。虽然从哲学上讲系统本身似乎更重要，但对实际工作者说来，第二种观点却无疑更加重要”^③。

以上我们对黑箱方法进行了理论性和技术性的介绍，并且也牵涉到了一些具有认识论意义的问题。下面再阐述有关的“灰箱方法”和“白箱方法”。

从认识论上讲，黑箱理论是以我们对所研究的对象一无所知为出发点的。然而，人类的真实认识史表明，它实际上是一个不断深化，逐步积累的过程。任何一个人，都是在直接接受了前人经验和知识的前提下，研究新的课题和新的对象的。用控制论的术语来讲，也就是在认识中往往出现这样的情况：我们面对的是对其有了部分了解的“黑箱系统”，也就是说它不是一个完全的

①②③ 艾什比：《控制论导论》，第106页。

黑箱。艾什比把这种系统称为“部分可察黑箱”，后来有人称之为“灰箱”。艾什比认为，在我们的认识中，对于某个系统已经有了局部的知识，而对于其他方面是不知的，或者说，我们观察一个系统时，只能看到它的某一部分，而其他部分是看不到的，这种“部分白”、“部分黑”的情况使用黑箱方法就不完全可靠了。艾什比说：“若一确定性系统只能部分地被观察到，从而（对观察者来说）变得不可预测，那末观察者只要考虑到该系统的过去的历史，即假定该系统内部存在一种‘记忆’性质，他就能使该系统又成为可预测的。”^① 这里的意思是说，我们对待“灰箱”问题，要相应地运用灰箱方法。在艾什比看来，要辨识这种“灰箱”系统，就要充分利用已有的知识，这些知识可以使我们知道系统过去的历史，就好象系统内部存在着一种“记忆”，只要了解了这种“记忆”，再加上运用其他方法得到的一些知识，就可以掌握系统的内部状态。

例如：有一个人有一天去他朋友家里，他的朋友养了一条狗。当外面开过来一辆汽车时，这条狗就跑到屋角畏缩起来。在这个人看来，这条狗的行为真是莫名其妙。然而，对于狗的主人来讲，狗的这种惧怕行为是可以理解的，因为他知道，前不久，这条狗曾被汽车压伤过。这里存在三个问题：（1）狗的惧怕行为来自它曾被汽车压过的“记忆”；（2）狗的主人的朋友面临着一个“狗有惧怕行为”的黑箱，他不能解释狗的这种行为；（3）狗的主人面临的是一个“狗有惧怕行为”的灰箱，所以他能解释狗的这种行为。这说明，一个被观察系统，它是黑箱还是灰箱往往对于不同的观察者而言的。

关于灰箱理论，生物学家巴沙（Erol Basar）曾经在其《生物物理和生理系统分析》中认为，系统科学者，特别是生物系统

① 艾什比：《控制论导论》，第116页。

研究者，一般是与灰箱(得到了一定程度阐明的黑箱)而不是与完全的黑箱打交道的。他进一步解释：有一个装置或系统实现一定作用，并且由此我们有了关于使一定作用可能得以实现的结构或过程的认识。我们把这样的装置或系统称之为灰箱。就是说，在灰箱中，我们具有关于实现输入—输出关系的结构和功能的部分知识。我国邓聚龙提出了灰色系统理论。

与灰箱方法的应用相联系，人们又提出了“白箱”理论。关于白箱理论，艾什比在《控制论导论》中曾称之为“全知的黑箱”。但是，维纳1962年再版《控制论》时在序言中讲得比较明确：“我把某些具有已知结构的物体叫做白箱，用它们表示所求展开式的各项。”^①什么叫“展开式的各项”呢？维纳认为就是白箱的网络。“白箱也具有类似的网络，它是我们为了获得输入——输出间一事先确定的关系，根据特定的构造计划，在输入和输出电压之间建立起联系的那种网络。”^②维纳的意思是说，白箱方法是这样的一种方法，当我们通过诸如黑箱方法、灰箱方法等认识了系统的内部结构时，我们就可以把这种结构关系按一定的关系式表达出来，这就是“白箱网络”。制定“白箱网络”不是白箱方法的全部目的，更重要的是通过这种“白箱网络”对系统进行再认识。或者利用这种“白箱网络”去控制系统以后的过程或预测系统的行为。

例如：我们使用电子计算机，其运算程序都是事先设计好的，这种程序就是以上所说的“白箱网络”。因为在设计“程序”时，我们对于程序输入计算机后，它的运算步骤、运算方式都是知道的。从这里，我们可以看到，白箱方法反映了比黑箱方法、灰箱方法高一级的认识水平。其表现有两点：（1）已知

① 维纳：《控制论》第二版序言，科学出版社1985年版，第XVI页。

② 同上，第XVII页注。

性。这种方法在对系统进行辨识时，已经有了关于此系统的比较全面的认识。（2）更大的预测性。一般地讲，完全的黑箱，我们最初是不可能有任何的预测性的，而到了灰箱，预测性随之增加，在白箱理论中，预测性则相对地达到了最好的程度。

总的来讲，黑箱方法、灰箱方法、白箱方法现在已经成为控制论中的一个重要分支——系统辨识的理论基础。什么叫系统辨识呢？它的英文名称是“identification”，也有人把它译作“系统测辨”或“系统识别”。从这个名词的直观意义看，它就是要辨别、测量与认识系统。精确点讲，它要解决如何正确建立动态系统数学模型的问题，而它采用的主要方法是先测出输入、输出数据，然后通过这些数据确定系统的结构与参数，从而求得定量描述系统的数学模型。具体地讲，系统辨识主要包括两个方面的内容：一是根据数据确定动态系统的阶或结构，二是估计动态微分方程或动态差分方程中的未知参数。由此我们看到，系统辨识是一种实验观测与理论分析相结合的方法。而这种结合之所以可能，正是因为它肯定了这样一个理论前提，即系统的输入、输出数据中包含了系统结构的信息。这正是黑箱方法的观点。但是，由于结构与功能的错综复杂的关系，人们很自然地提出了系统结构的可辨识性问题，即问在什么条件下，系统的结构才可以由输入、输出数据来决定。当然，这个问题还远远没有达到彻底解决的阶段。但这并不影响系统辨识方法在工程、生物、经济等领域的应用。

从以上对黑箱—灰箱—白箱方法的介绍和讨论中，我们可以看到，无论从黑箱、灰箱、白箱理论的形成过程看，还是从它们的基本内容看，它们都是人类认识过程中彼此联系又互有区别的认识阶段。这些理论虽然不是从哲学角度提出问题、研究问题的，也不是专门讨论认识论的，但它们也不象具体科学那样只讨论对一类对象的认识方法，而是从理论与技术的角度提出了许多带有深刻认识论意义的理论问题。

首先，它们明确了黑箱对认识主体来讲是不知，但不是不可知，并提供了一种认识它的新途径。人的认识是一个能动的过程，从这个角度认识不了的事物可以换一个角度去认识，一下认识不了的事物可以逐步去认识。这种灵活的、动态的认识过程保证了人们对认识客体的逐步逼近。

其次，黑箱、灰箱、白箱展现的正是一个认识逐步深化的过程。无论是人类的认识过程还是个体的认识过程，都是一个由不知到知、由浅到深的逐步深化运动。列宁曾经说过，在认识论上和科学的其他一切领域中一样，我们应辩证地思考，也就是说，不要以为我们的认识是一成不变的，而要去分析怎样从不知到知，怎样从不完全的、不确切的知识到比较完全比较确切的知识。可以认为，“黑一灰一白”这三个环节正是具体描绘了人类的认识不断深化的过程，并且提供了一种怎样由表及里、由不知到知、由知之较少到知之较多的科学手段。

第三，黑箱、灰箱、白箱方法给予人们理解真理的相对性和绝对性及认识的有限性和无限性的辨证关系以深刻的启迪。（1）黑箱永远有，白箱永不白。这是艾什比明确阐述过的思想。这正是说的真理的相对性和认识的无限性；（2）部分真理、相对真理也是可靠的，人们对绝对真理的追求只能通过相对真理来实现。这点在人们解决问题时应该是明确的。这样才能明白自己研究的是什么，用什么手段可以达到这种目的。并且，由相对真理到绝对真理并不总是一个不断积累的过程，而往往表现为一种中断性的跳跃。

第四，在黑箱一灰箱一白箱的方法中，认识对象和认识主体的交互作用、尤其是认识主体对于认识对象的主观能动性，是表现得很明显的。这正体现了人类认识的真实过程，即不断地认识、改造客观世界和不断地认识、改造主观世界的辩证统一的过程。

另外，要深刻了解黑箱方法，还有必要对电子计算机的本质进行一番研究。电子计算机实质上是一只黑箱。它的设计与发展

都与黑箱理论密切相关。关于这一点，我们在讨论人工智能时再展开论述。

第三节 形式化、数量化、最优化的方法

形式化、数量化与最优化的方法并不是控制论所特有的方法，但却是控制论理论及其应用在方法论上的特点。

这个特点是由控制论的学科性质所决定的。上面已一再提到了控制论要运用类比方法探索并确定不同系统的相似性。为了描述这种相似性并由此进而探索关于控制与信息共同规律，必需力求形式化，以便能够运用统一的科学语言加以处理。事实上，控制论在理论上与形式化、形式语言是密切相关的。而控制论机器作为一种自动机尤其如此。这从前一章中已可明显看出。

对控制论、控制系统的形式化是进行数量化研究的必要前提。控制论对控制论系统的研究不只是定性的，而且必须是、至少要尽可能地作到定量。数量化的研究是现代科学技术的突出特点，控制论也不例外。正因为不同系统具有某种相似性，而且都使用了一般的概念，例如信息概念，才有可能对不同系统的信息处理过程进行定量的处理。

有了定量的处理，就有可能进行比较与选择，从而必然出现最优化的要求。最优控制是控制论系统的一项必要的要求。当然，对于一些复杂的、大规模的系统来说，要求实现最优方案是不容易的，在某些情况下只要求满意或比较满意就可以了。这与以后将要提到的系统工程、运筹学、系统科学的要求是一致的，这反映了当前时代对于现代科学技术的要求。以上只说明了这个特点而没有加以具体的解释。读者可以从本书的前后篇章中加以具体的理解，在此就不作重复的叙述。

第四章 控制论的应用与主要分支

以上，我们论述了控制论的基本理论与方法，现在，进一步说明控制论的这些基本理论与方法是如何应用于各个不同的领域和方面并形成各个分支的。我们在本章中将简要地逐个论述控制论的一些主要分支学科。这在实质上涉及到控制论的体系问题。由于控制论是一门新兴的技术科学，它还在不断的发展过程中，不可能在现在就形成完整的体系。关于控制论的体系问题，在国内外学术界也没有一致的意见。因此，我们在此也不涉及它的体系问题，而着重讨论它在发展过程中形成的一些主要学科，这样做可能比较稳妥。

控制论作为技术科学与生物科学互相渗透的产物，随之而形成的分支学科，最早的就是工程控制论与生物控制论。与此相联系，特别是出于智能模拟的需要，逐步形成了人工智能这一重要分支。虽然现在一般都把它列入计算机科学内，但从控制论的角度看，是可以把它看作智能控制的核心部分的。

与以上分支相比较，经济控制论、社会控制论等的形成是较晚的，但它们也是一些重要的分支，并日益显示出这些分支对于社会管理的重大作用。

我们在下面将逐节地说明工程控制论、生物控制论、智能控制论与社会控制论这四个主要的分支。其中，在智能控制论部分着重说明人工智能，在社会控制论中着重说明经济控制论，而对一些其它有关分支则从略。

第一节 工程控制论

对于什么是工程控制论，它的定义是什么这类问题，国内外至今还没有一致的意见，在概念上也比较混乱。但人们却一致公认，我国学者钱学森于1954年在美国发表的专著《工程控制论》是工程控制论的奠基性著作。

虽然对工程控制论的定义与看法没有一致意见，但从历史发展过程来看，一方面，在控制论出现以前，在1945年前后，已经形成以伺服机构理论为核心的自动控制理论；另一方面，在1948年出现了控制论这一新兴学科，这两方面学科的相互结合，使得控制论的基本理论和方法运用于机械的、电机的和电子的自动控制系统的研究，就出现了工程控制论这一新兴学科。这一发展过程表明，工程控制论可以被理解为是控制论运用于工程技术方面而形成的自动控制理论。控制论与工程控制论在学科体系中属于两个不同的层次，后者又称为自动控制理论，或简称为控制理论，还有人称为系统理论（system theory）。我们必须将控制论（cybernetics）与控制理论（control theory）这两个概念区别开来。有不少同志在开始学习控制论时，往往以为控制论就是自动控制理论，这是一种误解。

就目前情况看，在概念上更容易混淆的是自动控制理论既可以指控制论以前的伺服机构理论，也可以指工程控制论。实际上，严格说来，这二者是有区别的。举一个事实就可以说明这一点。在第二次世界大战期间，德国法西斯研制成功了V-2火箭，这是现代火箭技术和航天技术的萌芽，它是在控制论诞生之前好几年研制成功的。这种以伺服机器理论为理论基础的机电式制导系统是很落后的。这里所谓制导，就是指对一个飞行器从目前位

置到将要到达位置的轨道上的导航进行控制。当时，德国法西斯向伦敦发射了2 000枚这种射程仅300公里的火箭，只有1 230枚落入市区，这其中又只有半数落在距目标中心13公里的范围内。后来，以工程控制论为理论基础的制导技术则达到了高精度、高可靠性的水平。它早已使射程为10 000公里的洲际导弹弹头落点的公算偏差在30米以内，使“海盗号”航天飞行器在远离地球7 000万公里处的火星上实行准确的软着陆。并且现在已经实现了空间飞行器的对接等更精确的技术。例如，1983年3月2日，苏联发射的“宇宙—1443”号卫星在轨道上与运行的“礼炮—7”航天站对接飞行成功。这些成果，都是与工程控制论分不开的。正如钱学森所指出的：“工程控制论在其形成的时候，就把设计稳定与制导系统这类工程实践作为主要研究对象。”^①由此可知，工程控制论虽然继承了伺服机构理论的成果，但决不局限于此，它是一种将控制论的基本理论与方法运用于工程技术方面，因而也创造出一些突破性成果的自动控制理论。本文作者是这样理解工程控制论的含义的。

工程控制论所包含的内容，是随着它的发展而不断丰富的。30多年以来，工程控制论的发展经历了三个阶段，这就是40至50年代的经典控制理论，60至70年代的现代控制理论和70年代以后的大系统控制理论。在每一个阶段中，由于社会生产和科研所提出的任务不同、对象不同，它们所运用的分析方法、数学工具就不同，基本内容与应用也不相同。我们用下面这个表来作比较的说明^②：

① 钱学森、宋健：《〈工程控制论〉序》，科学出版社1980年版。

② 本表根据何华灿：《人工智能》讲义（油印本），引用时稍有变动。

工程控制论发展的三个阶段：

	第一阶段	第二阶段	第三阶段
形成时期	20世纪40—50年代	60—70年代	70年代—
理论基础	经典控制理论	现代控制理论	大系统控制理论
研究对象	单因素控制系统 时不变系统	多因素控制系统 时变系统	多因素、多层次 控制系统
分析方法	传递函数、频率法	状态方程、时域法	时域法、模糊集方法
研究重点	反馈控制	最优、随机自适应控制	大系统、复杂系统 智能控制
核心装置	自动调节器	电子数字计算机	智能机器
应用	单机自动化	机组自动化	综合自动化

上表中所列出的各项是大致而择要的，不是很严格、很确切的，但它有助于我们对工程控制论的发展过程有一个粗略的了解，只有从这个发展过程中，我们才能弄清楚工程控制论的内容。

事实上，对于工程控制论包括和应该包括哪些内容，至今也没有一致的看法。不同的工程控制论论著所列的内容往往不同而互有出入。钱学森在1954年发表的《工程控制论》^①与其在1980年同宋健合著的《工程控制论》在内容上就有所不同，后者增加了很多内容，这正反映了20多年来这门学科的发展。如果我们将这些不同的看法加以概括整理，求同舍异，那么，工程控制论的基本内容还是大致可以确定的。何善培等曾做过如下的概括，认为工程控制论主要包括以下内容：

1. 线性系统理论；
2. 非线性系统理论；
3. 概率和统计方法的应用；

^① 钱学森：《工程控制论》，科学出版社1958年版。

4. 最优控制理论;
5. 自适应、自学习以及自组织系统的理论;
6. 系统辨识理论;
7. 大系统理论;
8. 模糊性理论;
9. 其它问题^①。

大致说来,在经典控制理论中包括了上述的1、2、3项。这三项也是以后的研究进展中不可缺少的内容。除此以外,4、5、6项主要属于现代控制理论的内容。7、8项则主要属于大系统控制理论。

以下将按发展阶段简略地介绍一下有关的主要内容。为了有助于读者稍微得到一些具体的了解,必要时我们将用一些典型的例子,难免也用到一些数学。对数学不熟悉的同志在阅读时对此可以省略,估计不致影响到对基本内容的了解。

一、经典控制理论

钱学森在1954年发表的《工程控制论》这一专著的内容基本属于经典控制理论的范围。这部著作所讨论的内容主要是线性系统,其中包括常系数线性系统、变系数线性系统,所用的数学工具与方法主要是由拉普拉斯变换(或简称拉氏变换法)引导出来的传递函数方法、频率响应法、根轨迹法;还讨论了有时滞的线性系统、平稳随机输入下的线性系统、取离散值的采样线性系统;对稳定性理论作了一些讨论;对非线性系统只作了比较简单的讨论。就这些内容来说,可以说基本上是继承了控制论以前伺服机构理论的成果。此外,在这部著作中又讨论了自行镇定和适应环

^① 参看何善堉、郑应平、裘聿皇:《工程控制论》,载《自动化》第1卷第1期,1977年。

境的系统、误差的控制等。50年代中期，西方开始在空间技术方面发展自动控制理论，研究了最优化问题，如快速控制系统、燃料耗量最少系统的研究等。在这一著作中也总结了这方面的早期成果。这就与控制论的特点密切相关了。而就整个著作来说，它是注意到控制论的理论与方法的应用的。因此，工程控制论是把控制论的基本理论与方法推广运用于工程控制系统，并吸收了伺服机构理论的成果，形成和发展起来的。从科学技术史的角度来看，在控制论以前，以伺服机构理论为主要内容的经典控制理论是以1945年美国的波德（Bode）写的《网络分析和反馈放大器设计》一书作为奠基性著作的。而控制论以后的作为工程控制论的经典控制理论则是以钱学森的《工程控制论》为奠基性著作的。我们当然是在后一意义上来理解经典控制论的含义的。但就内容来说，显然有相当一部分是伺服机构理论中就已经具有了的。

由此可知，作为工程控制论的经典控制论阶段是在本世纪的50年代。它的研究对象在当时的历史条件下，只能是比较简单的控制论系统，主要是单因素控制系统、时不变系统，即其输入、输出一般是单个的，其系统中的各种参量是不因时间的进程而改变的。它的主要内容是用时频分析方法、频率响应法和根轨迹法研究线性系统，用相平面法、描述函数法研究非线性系统。用 z 变换法研究采样控制系统的性能。此外还研究稳定性的代数判据和几何判据、校正网络等等。用这些理论和方法，基本上解决了单变量、时不变系统的分析和设计的问题。

现在，我们简略地介绍一些有关的基本概念与方法，以便使读者有一些比较具体的认识。

线性控制系统的数学模型

我们在第三章第三节中，已经指出控制论具有形式化、数量化的特点。因此，研究控制论系统的第一步，就是要把一个控制论系统用数学表达式加以描述，也就是建立它的数学模型。

一个控制论系统一般是能用相应的微分方程、差分方程等工具来近似地加以描述的。其中最简单、最常见的就是用常系数微分方程来描述的控制论系统，这种系统称为线性控制系统，或简称线性系统。关于什么是线性系统下面再解释，这里先说明如何建立这种数学模型。

在第二章中已经给出了闭环控制系统的框图。现在我们更具体地把一个技术控制论系统的框图表示如下：

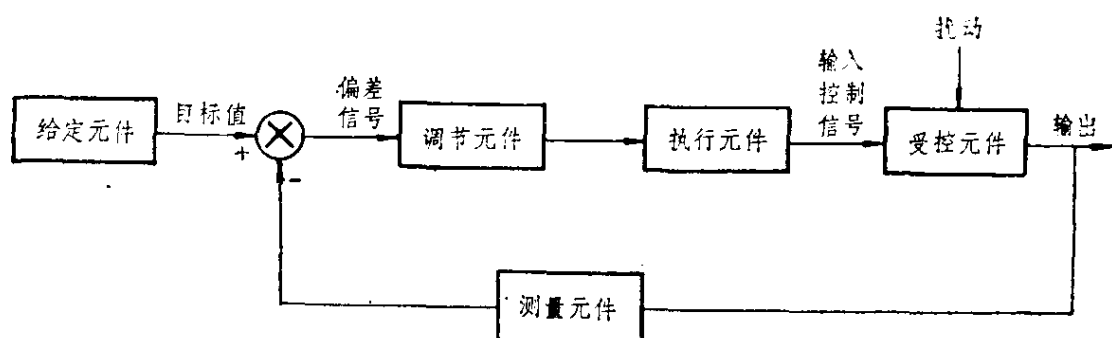


图4-1 控制论系统构成框图

由上图，一个技术的控制论系统或自动技术装置都是由一些元件、部件、信息通道所构成的。对于非技术性的控制论系统，也可视为由相应于元件、部件、信息通道的成分所组成。例如高等动物的神经系统是由感觉细胞、神经细胞、神经节、神经中枢等神经组织、器官等构成的。就自动技术装置来说，这些元件或由元件所组成的部件，以及作为信息通道载体的网络线路，它们总是机械的、电机的或电子的，并具有相应的一些特性。这些元件或部件的物理特性可以由相应的数学表达式来描述，一般都具有微分表达式或积分表达式。

例如，对机械元件来说，有关的基本物理规律是牛顿力学定律。当某一质量为 m 的机械元件在一光滑平面（摩擦力可忽略不计）按下图4-2作机械位移时，以 x 表示它在力 f 作用下的位移， a

表示运动的加速度，则由牛顿第二定律可知：

$$f = ma$$

$$\therefore a = \frac{d^2x}{dt^2}$$

$$\therefore f = m \frac{d^2x}{dt^2} \quad (1)$$

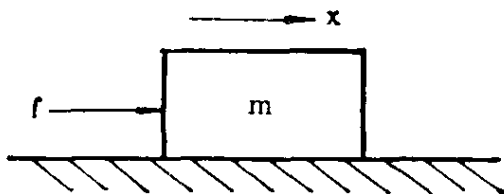


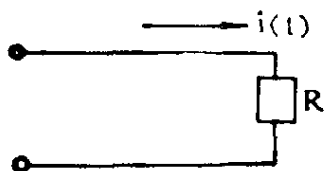
图4·2

(1) 式表示输入为 f 、输出为位移 x 时的微分方程式。

如果这一机械元件作机械转动，也可以按相应的转动定律，求出以力矩为输入，以转动角度为输出的微分方程式。

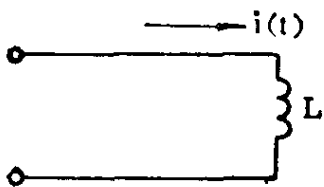
对于电路元件来说，经常用到电阻 R 、电感 L 和电容 C 这三种元件。当输入信号为电压 $u(t)$ ，输出信号为电流 $i(t)$ ，如图4·3所示，则这三种元件分别对应的微分或积分方程式列在图的右侧。

电阻：



$$i(t) = \frac{1}{R} u(t);$$

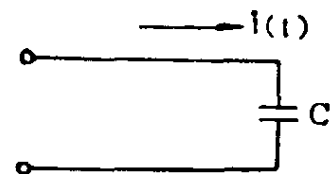
电感：



$$u(t) = L \frac{di}{dt},$$

$$\text{或 } i(t) = \frac{1}{L} \int u(t) dt;$$

电容：



$$i(t) = C \frac{du}{dt}.$$

图4·3 R 、 L 、 C 元件及其微分方程式

既然任一自动技术装置总是由一些机械元件和电气元件所组

合而成，每一种元件的物理特性都有相应的微分方程式来表示，那么当这些元件或部件（如各种门电路）照一定的线路（如并联或串联等）组合起来时，就能相应地求出描述该系统的微分方程式。作为一种最简单的、最常用到的微分方程式是线性常系数微分方程：

$$\begin{aligned} & a_n \frac{d^n y}{dt^n} + \cdots + a_i \frac{d^i y}{dt^i} + \cdots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y \\ & = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + \cdots + b_j \frac{d^j x}{dt^j} + \cdots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \end{aligned} \quad (4.1)$$

上式中， $y(t)$ 表示输出， $x(t)$ 表示输入，它们都是时间 t 的函数。 a, b_j 为常数系数，并且要求：

$$\begin{cases} a_i & i = 0, 1, 2, \cdots n \\ b_j & j = 0, 1, 2, \cdots m \end{cases} \quad m \leq n$$

这样，我们就求得有关控制论系统的一种最简单的数学模型。进一步要分清下述概念：

线性系统与非线性系统

我们用上述的方法建立的数学模型是描述控制系统内部各物理量（或变量）之间关系的数学表达式。由于控制系统具有动态的特点，各个变量在动态过程中的关系当然总是一般表现为微分方程的形式。在微分方程分类中，有线性微分方程与非线性微分方程。当一控制系统的数学模型是线性微分方程时，称为线性系统。它必须满足下列二条件：

1. 齐次性：若输入 $x_1(t)$ 引起的输出为 $y_1(t)$ ，则以常数 a 作用于输入 $x_1(t)$ ，使新的输入为 $ax_1(t)$ ，则输出相应地为 $ay_1(t)$ ，可用图表示如下：

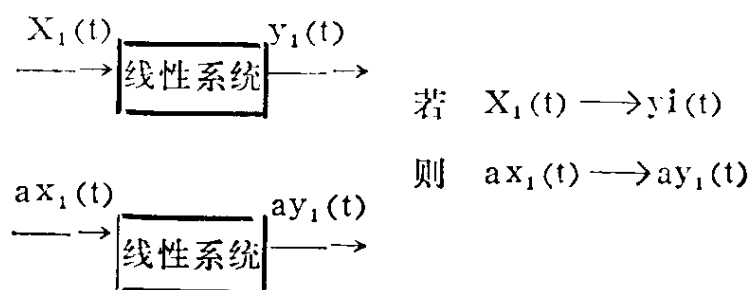


图4·4 线性系统的齐次性

2. 迭加性: 若输入为 $x_1(t)$, $x_2(t)$, 当分别输入时, 对应的输出分别为 $y_1(t)$, $y_2(t)$ 。现将 $x_1(t)$ 与 $x_2(t)$ 的迭加式 $x_1(t) + x_2(t)$ 作为输入, 则输出为相应的迭加式 $y_1(t) + y_2(t)$ 。用图表示如下:

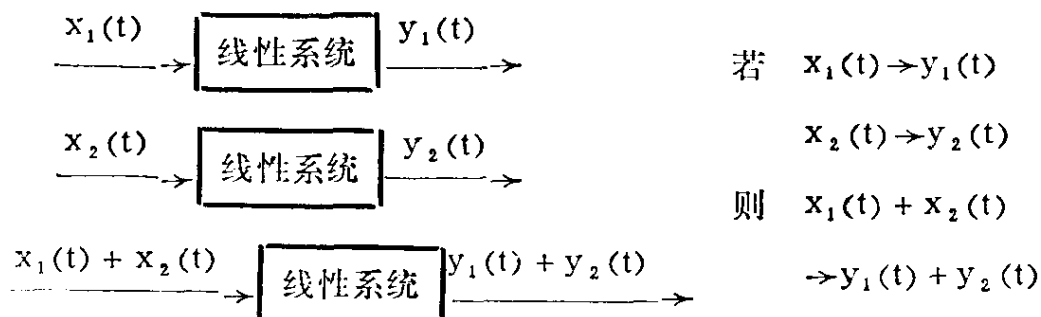


图4·5 线性系统的迭加性

线性系统的齐次性与迭加性可以统一地表示为:

$$a_1 x_1(t) + a_2 x_2(t) \longrightarrow a_1 y_1(t) + a_2 y_2(t) \quad (4 \cdot 2)$$

(4·2) 式表示线性系统的线性特性。这个特性使我们可以十分简便地研究这种控制系统。因为这种系统的输入与输出之间成很简单的关系。当其输入是多个时, 只要这多个输入是某输入的成倍增加或某些输入的迭加, 那么其输出就是相应的各个输入单独作用时所产生的输出之总和。

当(4·1)式所列的微分方程式具有上述的线性关系, 而且这系统的性能(如稳定性、快速性、准确度等等)不随时间而变化, 即其系数 $a_0, a_1, \dots, a_n$, 及 $b_0, b_1, \dots, b_m$ 都不随时间而变化, 即为常系数时, 方程即为常系数线性微分方程, 它所描述的系统

为线性系统。

反之，当不满足线性条件中的任一条，或者说，在一自动控制系统中只要包含有非线性的环节（元件或部件）时，就是非线性系统。事实上，任何一个系统都具有不同程度的非线性特性，因而一般都是非线性系统。只是当我们建立数学模型时，往往把一些次要的非线性因素加以忽略，使之成为线性的数学模型。虽然这种描述是近似的，但这样处理会带来很大的方便。所以，线性系统可以说是非线性系统的一种粗略的简化模型。

当然，有一些系统中的某些非线性特性是不可忽略的，不能简化为线性系统来处理。于是我们也就必须把它们作为非线性系统来处理。我们知道，对非线性方程求解是比较困难的，至今没有普遍有效的数学工具与方法。在这种情况下，除了对某些情况仍可找出一些办法使之线性化以外，大多只得用近似的数值计算来处理，甚至只能作定性的描述与讨论。

在这里涉及到重要的方法论问题。一方面，现实世界中存在的是程度不同的非线性系统，我们用科学抽象与简化的方法从中得出非线性系统的线性模型。而另一方面，我们又要尽可能将难以简化的非线性系统作线性化的近似处理。所以，线性与非线性是既相区别又相联系的，它们除了本身的客观性质以外，还与我们的主观方面的处理方法有关。

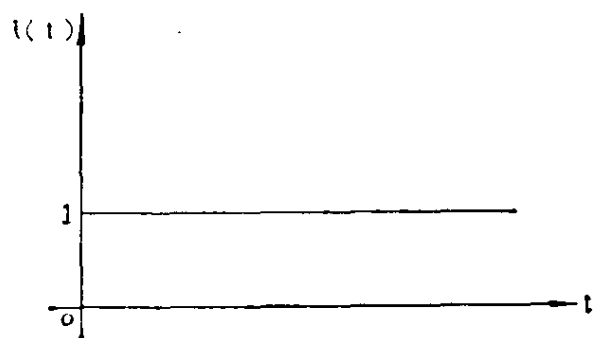
拉氏变换与传递函数

在我们列出了如（4·1）式的常系数线性微分方程，也就是找出某一线性系统的数学模型以后，下一步就是求解。求解是一个数学处理过程。这一过程对于一个控制系统来说，就是给出输入并在一定条件下求其输出。在经典控制理论中，一般把这个系统看作黑箱，对其内部结构是不知道的，或是不加考虑的。在这种条件下，给定输入以求输出，实际上就是输入通过系统的变换得到输出，即这个系统的效应，在控制理论中将这种输出称为

响应。

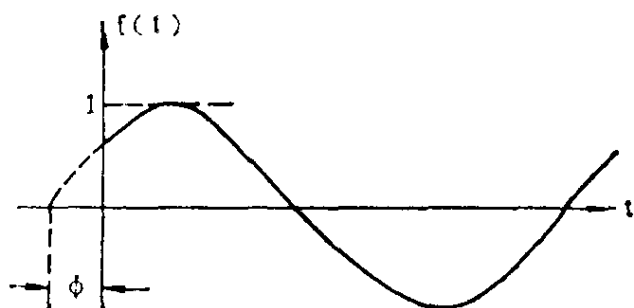
在控制系统的研究中，不仅系统的性能要用相应的微分方程表示出来，而且它的输入量与输出量也是用一些特定的函数来描述的，从而使得对系统的研究是数量化的。下面只举出几种有代表性的常用输入函数，右边是数学定义，左边是描述其特性的坐标图：

1. 单位阶跃函数 $1(t)$ ：



$$1(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ \text{不确定} & t = 0 \\ 1 & t > 0 \end{cases}$$

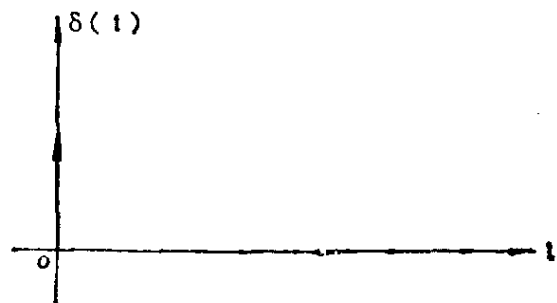
2. 单位正弦函数：



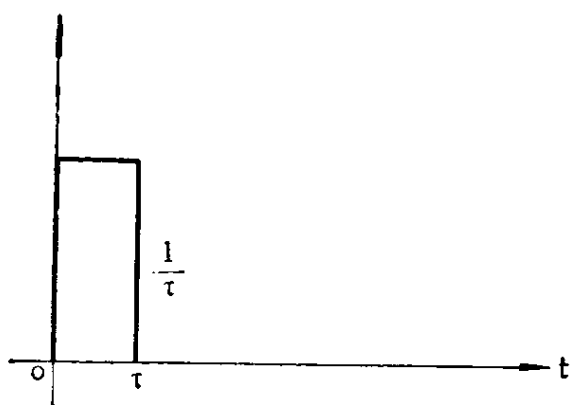
$$f(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ \text{Sin}(\omega t + \phi) & t \geq 0 \end{cases}$$

$$\text{即： } f(t) = \text{Sin}(\omega t + \phi) \cdot 1(t)$$

3. 单位脉冲函数 $\delta(t)$ ：



$$\delta(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \quad t > 0 \\ \infty & t = 0 \end{cases}$$



左图表示面积为 1 的矩形脉冲函数，其 $\delta(t)$ 函数的面积为 1，一般以面积表示 $\delta(t)$ 的强度，故强度为 A 的脉冲函数 $f(t)$ 可表示为：

$$f(t) = A \cdot \delta(t)$$

图 4.6 几种典型的输入函数图

显然，单位脉冲函数与单位阶跃函数之间有下列关系：

$$\delta(t) = \frac{d}{dt} 1(t)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1$$

这两个式子分别表示单位脉冲函数可以看作是单位阶跃函数的导数，而单位脉冲函数的积分就是单位阶跃函数。所以，单位阶跃函数是一种用以评价控制系统动态性能的典型输入。

我们在上面仅仅举出三种典型的输入函数，而没有全部加以列举。在这三种中，前两种在一定区域内都是取连续值的，适用于取连续信号的系统，后一种是取离散值的，适用于取离散信号的采样控制系统。下图就是把连续信号在离散的瞬时上进行采样后再进行控制。（图中的 T 为采样周期）：

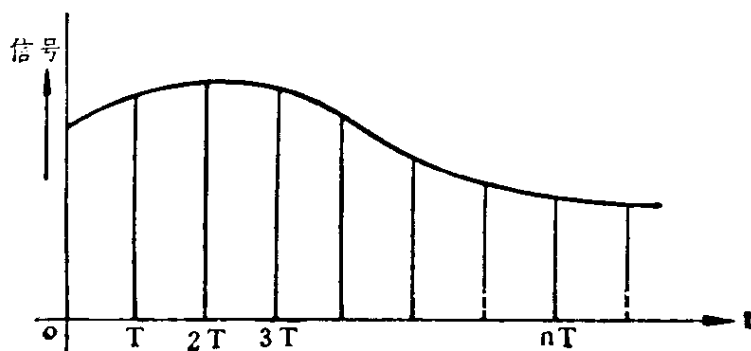


图 4.7 信号的采样

经过这种信息处理，把一部分信息数字化，便于直接应用数字计算机对系统进行控制。这种控制的数学模型当然不能是取连续值的微分方程式，而是取离散值的差分方程式。在微分方程的理论中，特别是微分方程的数值解法中，微分方程一般是存在着与它近似的差分方程的。给出一个微分方程，就可以求出与它对应的差分方程。在这里，我们不给出差分方程的一般形式，也不说明如何由微分方程来求其对应的差分方程。我们只举一个简单的例子。下面就是一个差分方程：

$$x(k+2) + 3x(k+1) + 2x(k) = 0$$

$$x(0) = 0, \quad x(1) = 1$$

显然，取 $k = 0$ ，上式就是：

$$x(2) + 3x(1) + 2x(0)$$

$$= x(2) + 3 \cdot 1 + 2 \cdot 0$$

$$= x(2) + 3 = 0$$

$$\therefore x(2) = -3$$

由 $x(0) = 0$ ， $x(1) = 1$ ， $x(2) = -3$ ，再进行递推，就可以求出 $x(3)$ ， $x(4)$ ，…的值。

由上述的例子可以看出，对于取离散值的采样控制系统来说，它的一个主要优点就是它的数学模型不是微分方程，而是相应的差分方程，只要进行简单的四则运算就能递推出所需的输出值或控制信号。所以特别便于利用电子计算机来进行控制。

以上所讲到的输入或输出，不论是取连续值还是离散值，都是属于确定的值。除了取确定值的控制系统以外，还有另一类是取不确定值的控制系统，其中重要的一种就是取随机值的随机控制系统。随机控制理论是工程控制论的一个重要分支，它运用概率与统计方法研究控制系统。它所建立的数学模型是随机微分方程，也可以用采样方法将随机微分方程简化为随机差分方程，以便于数字计算机的应用。此外，它还研究滤波器理论，这是与预

测理论密切相关的。

由上可知，在我们建立了控制系统的数学模型以后，给出定量的输入值，就要求其输出值，这也就是求解的问题。在此，我们只就最简单的情况举例加以说明。

在（4·1）式所示的线性常微分方程式中，如果所有对时间的微分项均为零，就是说输入与输出均不随时间而变化，即这一线性控制系统是处于静态而不是处于动态的情况下，则输入与输出之间表现为下述的比例关系：

$$y = \left(\frac{b_0}{a_0} \right) x \quad (4 \cdot 3)$$

其比例系数 $k = \frac{b_0}{a_0}$ ，

是一种最简单的线性关系。它的线性方程式为 $b_0 x - a_0 y = 0$ ，在解析几何中，用右图表示：

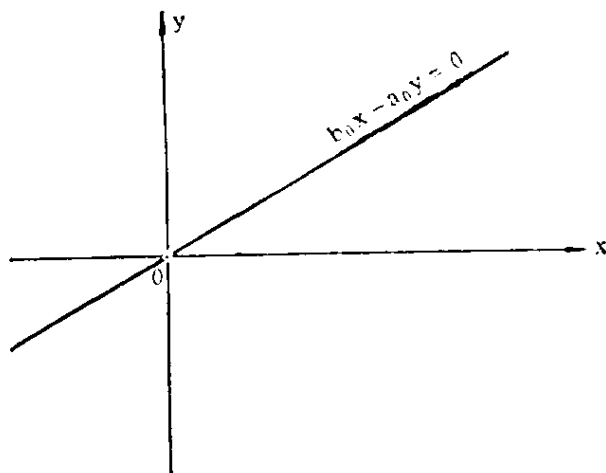


图4·8 $b_0 x - a_0 y = 0$ 的坐标图

从控制系统来分析，这就是单输入 x 经过取比例系数 $\frac{b_0}{a_0}$ 值的变换而得到的输出 y ，其值为 $\left(\frac{b_0}{a_0} \right) x$ ：

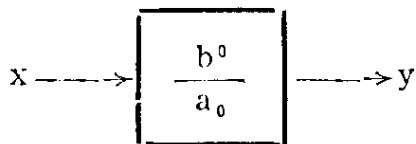


图4·9 单输入、单输出系统框图

这种输入与输出之间的关系，从数学上来看，显然是一种函数关系。在（4·3）式中，如果我们取 $\frac{b_0}{a_0}$ 为函数关系 f ，则（4·3）式为：

$$y = f(x)$$

同时， $\frac{b_0}{a_0}$ 也可以理解为一种算子。当这一算子作用于 x 时，就得到 y 。

从控制理论的角度来看，就把这种函数关系称为传递函数。这是控制理论中的一个基本概念，实质上就是一种算子所起的变换作用。要注意的是，在经典控制理论阶段，我们是把系统看作黑箱的，所以传递函数一般并不事先给出。因为对于黑箱来说，是不可能事先知道其内部结构的。传递函数可通过输入与输出之间的关系求得。传递函数可以看作一系统内部结构的外在功能的表现。一旦求出传递函数，那么对于任一给定的输入，就会存在着相应的输出。在控制理论的框图中，把传递函数写在代表系统的那个方框内，如图4·9， $\frac{b_0}{a_0}$ 就是该系统的传递函数。

进一步，再来求出静态的反馈控制系统的传递函数。框图如下：

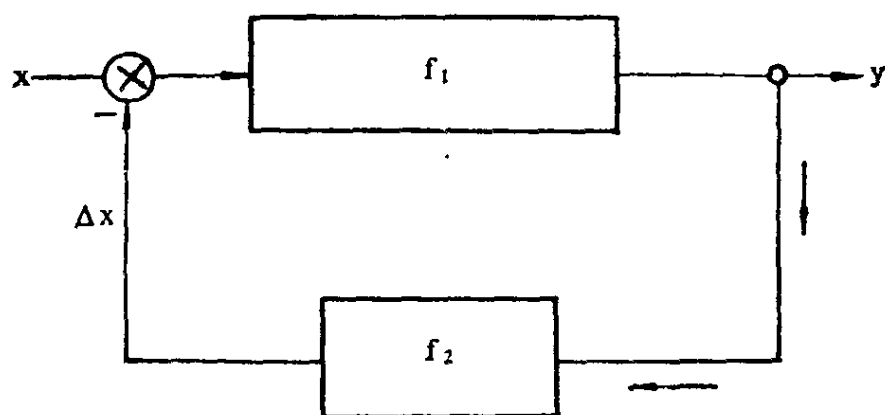


图4·10 反馈控制系统框图

上图不过把这个系统分为两个子系统，一个是由输入 x 到输出 y 的子系统，设其传递函数为 f_1 ，另一个是由输出 y 回输到输入的反馈子系统，其传递函数为 f_2 ，经过反馈后的输入为 Δx ，则：

$$y = f_1(x) = f_1 \Delta x$$

(注意：因为在此是简单的比例关系，故可将 $y = f_1(x)$ 简写为 $y = f_1x$ 。)

$$\Delta x = f_2(y) = f_2y$$

就整个系统来看，则：

(注意：因输出 y 回输，故取负号。)

$$y = f_1(x - \Delta x)$$

$$= f_1(x - f_2y)$$

$$= f_1x - f_1f_2y$$

$$y + f_1f_2y = (1 + f_1f_2)y = f_1(x)$$

$$\therefore y = \frac{f_1}{1 + f_1f_2}x \quad (4.4)$$

这就是控制论系统或反馈控制系统的基本公式（静态条件下）。维纳给出了这个数学表达式，只是形式上略有不同^①。这个系统的传递函数就是 $\frac{f_1}{1 + f_1f_2}$ ，用框图表示如下，它与图4.10

是等价的。

以上我们只以初等数学作为工具，以最简单的、静态的系统为例，通俗地说明了传递函数这个重要概念以及这一概念在数学



图4.11 反馈控制系统的方框图

中与控制理论中的涵义。同时，我们给出了控制论系统在静态条件下的基本公式。这样，我们就对控制论的数量化特点和工程控制论处理问题的方法有了一个最初步的了解。下面，我们仍用一个简单的例子来说明拉氏变换以及如何求出传递函数的方法。缺乏微积分知识的读者可以略去这部分内容。

在建立了控制系统的数学模型之后（例如对于线性系统建立

① 维纳：《控制论》第二版，科学出版社1985年版，第104页。

了如(4·1)式的线性常系数微分方程)，为了对它求解，在微分方程理论中一般根据条件是有一些处理方法的。但这些方法往往比较麻烦，特别是当微分方程比较复杂，如阶数较高，求它的特征方程就较困难；为了决定积分常数，解多元联立代数方程也较复杂，因此就必须找到一些简便的方法来求解微分方程。拉氏变换的方法便是其中的一种，这种方法在工程技术中被广泛应用。现在简单介绍如下，不给出严格的数学条件与证明。

定义：设函数 $f(t)$ 当 $t \geq 0$ 时有定义，而且积分 $\int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt$ (s 是复变量，如 $s = \delta + j\omega$ ，其中 δ 为实变量， ω 为虚变量)在 s 的某一域内收敛，则由此积分所确定的函数可写为

$$F(s) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt$$

我们称上式为函数 $f(t)$ 的拉普拉斯变换式(简称拉氏变换式)，记为

$$F(s) = L[f(t)]$$

$F(s)$ 称为 $f(t)$ 的拉氏变换。

若 $F(s)$ 是 $f(t)$ 的拉氏变换，则称 $f(t)$ 为 $F(s)$ 的拉氏反变换，记为

$$f(t) = L^{-1}[F(s)]$$

$F(s)$ 称为 $f(t)$ 的象函数， $f(t)$ 称为 $F(s)$ 的原函数。

要使上述的拉氏变换式成立，即要 $F(s) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt$ 在一定的实数域上收敛，是有条件的。这些条件由拉氏变换的存在定理给出。在此只要指出，这些条件在控制理论中一般是能满足的。同时，拉氏变换有一些重要的性质，对于控制系统的分析与处理是很方便的。例如，它具有与线性系统的条件一样的线性性质；又如，它还具有如下的微分性质：

若 $L[f(t)] = F(s)$

则有 $L[f'(t)] = sF(s) - f(0)$ 。

这表示函数 $f(t)$ 求导后取拉氏变换等于这函数乘以参变数 s 后再减去这函数的初值 $f(0)$ ，结果是消去了导数项。这就大大简化了计算。此外还有一些重要的性质，这里不再一一叙述。它们都具有简化计算的优点，便于在工程技术上应用。

现在我们把拉氏变换运用于线性系统：

在线性常系数微分方程(4.1)式中，输入 $x(t)$ 与输出 $y(t)$ 都是取实数值的时间的函数。其相应的拉氏变换为：

$$X(s) = L[x(t)] = \int_0^{\infty} x(t)e^{-st} dt$$

$$Y(s) = L[y(t)] = \int_0^{\infty} y(t)e^{-st} dt$$

由上述的微分性质，已知

$$L[f'(t)] = sF(s) - f(0)$$

同理： $L[f''(t)] = s^2F(s) - sf(0) - f'(0)$

$$L[f'''(t)] = s^3F(s) - s^2f(0) - sf'(0) - f''(0)$$

将上述微分性质运用于线性系统，设系统的初始条件为零，即 $t = 0$ 时，函数 $x(t)$ 与 $y(t)$ 及其各阶导数的初始值均为零，即：

$$x(0), x'(0), x''(0), x'''(0), \dots, = 0$$

$$y(0), y'(0), y''(0), y'''(0), \dots, = 0$$

则

$$L\left[\frac{dx}{dt}\right] = s \cdot X(s), L\left[\frac{d^2x}{dt^2}\right] = s^2X(s),$$

$$L\left[\frac{d^3x}{dt^3}\right] = s^3X(s), \dots$$

$$L\left[\frac{dy}{dt}\right] = s \cdot Y(s), L\left[\frac{d^2y}{dt^2}\right] = s^2Y(s),$$

$$L\left[\frac{d^3y}{dt^3}\right] = s^3Y(s), \dots$$

代入(4.1)式得:

$$\begin{aligned} & [a_n s^n + \cdots + a_1 s + a_0] Y(s) \\ &= [b_m s^m + \cdots + b_1 s + b_0] X(s) \end{aligned} \quad (4.5)$$

则:

$$Y(s) = \left(\frac{b_m s^m + \cdots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + \cdots + a_1 s + a_0} \right) X(s) \quad (4.6)$$

(4.6) 式就是我们所求的输出值, 但却是在复数域上给出的值。由于有相应的拉氏变换表, 我们就能先由 $x(s)$ 查表求出 $X(s)$ 值; 再由 (4.6) 式求得 $Y(s)$ 后, 再由 $Y(s)$ 查表求出 $y(t)$ 这一所需的输出值。

比较一下 (4.1) 式与 (4.5) 式, 可以看出, 经过拉氏变换后, 就把 (4.1) 式这一微分方程变换为等价的代数方程。这样, 求解就简便得多了。这是运用拉氏变换法的一个最大的优点。为什么能够如此简化? 这是因为微分方程式 (4.1) 中的时间函数 $x(t)$ 与 $y(t)$ 是在实数域上取值的, 而代数方程式 (4.6) 都是在复数域上取值的。我们知道, 正如在电学、电工学中引入复数可以大大简化计算一样, 在这里微分方程也由复数的引入简化为代数方程。用初等集合论的语言来说, 这是把一实数域映射到相应的复数域的结果。不仅如此, 在进行拉氏变换的同时, 我们已经将初始条件引入 (在这里是令 $t = 0$), 这就可避免经典解法中求积分常数的麻烦。而且, 如果我们再把微分方程式 (4.1) 与代数方程式 (4.5) 逐项比较一下, 还能发现不必进行一步一步的演算, 只要在微分方程式 (4.1) 中, 直接把 $x(t)$ 与 $y(t)$ 代以 $X(s)$ 与 $Y(s)$, 将微分算子 $\left(-\frac{d}{dt}\right)$ 代以 s , 就得到代数方程 (4.5)。这几点都说明了

拉氏变换方法能简化计算这一突出优点。

下面用一个简单的例子来说明如何用拉氏变换方法解微分方程。

例：某线性系统的数学模型为线性常系数微分方程，求输入为单位阶跃函数 $x(t) = 1(t)$ 时的输出函数：

$$T \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = x(t)$$

（注意：上式相当于在（4·1）式中令 $n = 1$, $m = 0$, $a_1 = T$, $a_0 = 1$, $b_0 = 1$ 所得的方程）

已知输入为 $x(t) = 1(t)$ ，由拉氏变换表得 $X(s) = \frac{1}{s}$

设系统的初始条件为 $t = 0$ ，由上述微分方程式可得相应的代数方程：

$$T_s Y(s) + Y(s) = X(s)$$

$$\text{则： } Y(s) = \left(\frac{1}{T_s + 1} \right) \left(\frac{1}{s} \right)$$

查拉氏变换表，求得输出函数为：

$$y(t) = 1 - e^{-\frac{t}{T}}$$

这个结果与由经典方法求出的值是一样的，但在计算上则简便得多了。

以上是从数学方面来加以讨论的。不仅如此，控制理论由拉氏变换方程直接引导出求传递函数的方法：

由（4·6）式，并参考（4·4）式，显然（4·6）式的系数部分就是传递函数，即：

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_m s^m + \dots + b_1 s^1 + \dots + b_1 t + b_0}{a_n s^n + \dots + a_s s^1 + \dots + a_1 s + a_0}$$

可见传递函数可定义为在零初始条件下，系统的输出和输入的拉氏变换之比。以 $W(s)$ 表示传递函数，即：

$$W(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad (4 \cdot 7)$$

用方框图表示如下：

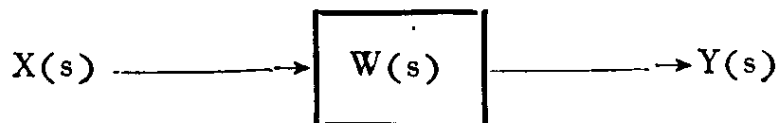


图4.12 传递函数示意图

在上例中，由

$$T_s Y(s) + Y(s) = X(s)$$

$$Y(s)(T_s + 1) = X(s)$$

可知其传递函数：

$$W(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{T_s + 1}$$

现在再回到图4.1所示的反馈控制系统，如果已知各种元件的传递函数，就可用系统分析的方法求出整个系统的传递函数，如图所示：

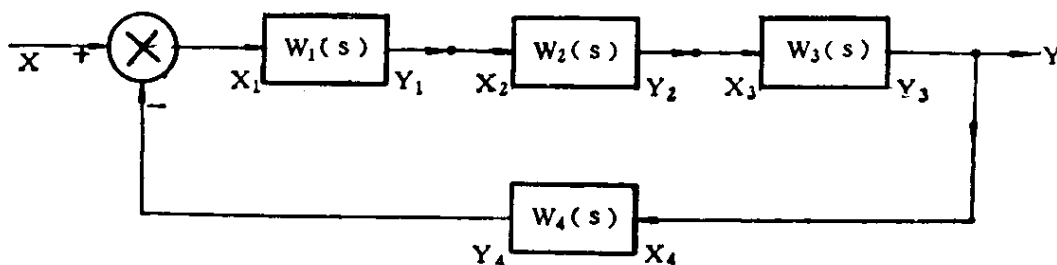


图4.13 控制论系统方框图

由图：

$$Y_1(s) = W_1(s) \cdot [X(s) - Y_4(s)]$$

$$Y_2(s) = W_2(s) \cdot Y_1(s)$$

$$Y(s) = W_3(s) \cdot Y_2(s)$$

$$Y_4(s) = W_4(s) \cdot Y(s)$$

在进行运算后，可知这个闭环系统的传递函数 $\phi(s)$ 为：

$$\phi(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{W_1(s)W_2(s)W_3(s)}{1 + W_1(s)W_2(s)W_3(s)W_4(s)} \quad (4.8)$$

式中系统的开环传递函数为：

$$W(s) = W_1(s)W_2(s)W_3(s)W_4(s) \quad (4.9)$$

将(4.8)式与(4.5)式加以比较, 就能看出二者是相似的。
(4.5)式是对静态特性的描述, (4.8)式则是对系统动态特性的描述。传递函数就是描述系统动态特性的基本概念。

线性系统特性分析的经典方法

在说明了传递函数这个基本概念后, 现在列举一下经典控制理论中对于单输入、单输出的线性系统的特性分析的三种经典方法:

1. 传递函数方法。这种方法将微分方程变换为相应的代数方程, 它属于一种代数方法。因为在微分方程中输入与输出是时间的函数, 故又称时域的方法。我们根据微分方程的(即其传递函数的分母的)特征根的分布情况, 就能分析线性系统的动态特性。例如对稳定性的分析就是如此, 这点将在下面再说明。

代数方法虽然是一种很简便而有效的方法, 但在有些情况下, 系统特征方程的次数比较高, 或是系统的参数和结构有变化, 甚至其中的某些元件或部件的传递函数难以求出时, 就要采用下述两种方法来弥补其不足。

2. 频率响应法。这是1932年奈奎斯特(H. Nyquist)提出的。当时的通讯工程中已经采用频率响应的方法来描述电路, 奈奎斯特则进一步用系统的频率特性来判别稳定性, 即奈奎斯特判据。

我们对一线性系统输入一个频率为 ω 、波幅为 x_0 的正弦信号:

$$x(t) = x_0 \sin \omega t = x_0 e^{j\omega t}$$

由这系统的线性性质, 在稳定情况下, 输出必然仍是频率为 ω 的正弦信号, 不过波幅增加 $A(\omega)$ 倍, 相位变化 $\varphi(\omega)$, 即:

$$\begin{aligned} y(t) &= [x_0 A(\omega)] \sin[\omega t + \varphi(\omega)] \\ &= [x_0 \cdot A(\omega)] e^{j(\omega t + \varphi(\omega))} \end{aligned}$$

在我们求出 $x(t)$, $y(t)$ 的各阶导数并代入相应的微分方程后, 可以求出系统在稳定情况下输入与输出的比值:

$$\left. \frac{y(t)}{x(t)} \right|_{\omega} = \frac{b(j\omega)^n + \dots + b(j\omega)^1 + \dots + b_1(j\omega) + b_0}{a_n(j\omega)^n + \dots + a_1(j\omega)^1 + \dots + a_1(j\omega) + a_0}$$

上式表示系统在正弦信号输入下的特性，其右边的表达式就是系统的频率特性。将上式与(4.6)式比较，可以明显看出，只要将传递函数中的 s 换为 $j\omega$ ，即 $s = j\omega$ ，就可求得系统的频率特性：

$$W(j\omega) = \left. \frac{y(t)}{x(t)} \right|_{\omega} = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}$$

其中： $A(\omega)$ 表示幅频特性， $\varphi(\omega)$ 为相频特性。

利用频率特性，就可以用几何方法作图来分析系统的特性。根据幅频与相频，可以作出系统的极坐标图，称为奈奎斯特图。运用这种图，奈奎斯特判据就可以根据一系统的开环频率特性来判断闭环系统的稳定性。此外还可用于对数坐标图(又称波德图)、增益—相位图来分析系统的特性。

由此可知，频率响应法是一种几何方法。频率特性可以看作以 $j\omega$ 代以传递函数中的 s ，也可以把频率特性看作是传递函数的一种推广或特殊形式。由于作为时域分析方法的传递函数与频率特性有这种联系，有的著作又把基于传递函数或频率特性的理论和方法称为频域的方法。

3.根轨迹法。这种方法是伊文思(W.K.Evans)在1948年提出来的。由上可知，系统的特性是由闭环特征方程式的根所决定的。如果我们能够在 S 平面上把这些根的分布及其与系统参数之间的关系弄清楚，那么，就不仅能够掌握系统的频率特性，而且能掌握系统的时间特性。为此，伊文思令开环传递函数的一个参数从0变到 ∞ ，那么，与此对应的特征方程的根就会在 S 平面上描出一条轨迹，这条轨迹就称为根轨迹。由根轨迹图可以分析和判别系统的特性并进行系统的设计。所以这也是一种几何的、作图的方法。

以上三种方法都是经典的方法，都是在控制论之前已经在控

制理论中被提出和使用的方法。其中，我们只对传递函数的概念和方法作了较系统的说明，而其它两种方法只简略地说明了其基本思想。

线性系统的稳定性：

稳定性是控制系统的一种很重要的特性。一个系统的稳定性，就是指作用其上的扰动排除后，系统能否恢复原状，或以什么样的精度恢复原状的性能。在我们给出线性系统的微分方程如(4.1)式以后，可给出其稳定的条件：

为了方便，令(4.1)式中左端关于输出的第一项的系数 a_n 为1，得下式：

$$\begin{aligned} \frac{d^n y}{dt^n} + \dots + a_1' \frac{d^1 y}{dt^1} + \dots + a_1' \frac{dy}{dt} + a_0' y \\ = b_m' \frac{d^m x}{dt^m} + \dots + b_j \frac{d^1 x}{dt^1} + \dots + b_1' \frac{dx}{dt} + b_0' x \end{aligned} \quad (4.10)$$

现设输入为扰动 $d(t)$ ，将上式右端中的 $x(t)$ 代以 $d(t)$ ，再求出其传递函数 $W(s)$ 为：

$$W(s) = \frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{b_m' s^m + \dots + b_1' s^1 + \dots + b_1' s + b_0'}{s^n + \dots + a_1' s^1 + \dots + a_1' s + a_0'}$$

为了查明在加入瞬时扰动后能否稳定下来，设此扰动 $d(t)$ 为一单位脉冲信号，即 $d(t) = \delta(t)$ ，其象函数为：

$$D(s) = L[\delta(t)] = 1$$

则在 $\delta(t)$ 作用下的输入 $Y(s)$ 为：

$$\begin{aligned} Y(s) \Big|_{\delta(t)} &= W(s) = \frac{b_m' s^m + \dots + b_1' s^1 + \dots + b_1' s + b_0'}{s^n + \dots + a_1' s^1 + \dots + a_1' s + a_0'} \\ &= \frac{A(s)}{B(s)} \end{aligned} \quad (4.11)$$

上式中的 $A(s)$ ， $B(s)$ 分别代表分子、分母的多项式。由上式可知，要分析这个线性系统在什么条件下是稳定的，就要求上式在 $t \rightarrow \infty$

时能保持为有限值（或为零）。

由上式已知 $Y(s)|\delta(t) = W(s)$ ，所以只需讨论 $W(s)$ 就够了。
将(4·11)式的分母进行因式分解：

$$W(s) = \frac{b_m's^m + \dots + b_j's_j + \dots + b_1's + b_0}{(s - p_1)(s - p_2)\dots(s - p_n)}$$

其中 $p_1, p_2, \dots, p_n$ 为 $B(s) = 0$ 的 n 个根。用部分分式法，可得：

$$\begin{aligned} W(s) &= \frac{c_1}{s - p_1} + \frac{c_2}{s - p_2} + \dots + \frac{c_n}{s - p_n} \\ &= \sum_{i=1}^n c_i \frac{1}{s - p_i} \end{aligned}$$

其中 $c_i = \lim_{s \rightarrow p_i} (s - p_i) W(s)$ $i = (1, 2, \dots, n)$ 。因此有

$$Y(t) \Big|_{\delta(t)} = \sum_{i=1}^n c_i e^{p_i t} \quad (4 \cdot 12)$$

由上式可知，只当 p_i 的实部为负数，在 $t \rightarrow \infty$ 时 $Y(t)$ 才可能是有限的，否则 $Y(t)|\delta(t)$ 必然趋向无穷大，或出现自持振荡，则是不稳定的。

上述的讨论中，只用到 $W(s)$ 中的分母 $B(s)$ ，也就是说，只要对 $B(s) = 0$ ，即系统的特征方程的根（极点）加以研究就行了。

由此可见，线性系统的稳定性条件是要求该系统的特征方程式的所有的根均为实数。也就是说，系统的极点皆在复平面 S 的左半平面上。这表明，系统的稳定性完全由传递函数的极点位置来决定，（所以，当用代数方法处理有困难时，用几何作图的方法、实验的方法也是有效的。）而系统传递函数的极点完全取决于系统本身而与外界条件无关。

通过这些讨论，我们对特征方程的根对于系统特性的决定作用也有了一些具体的了解。

有关稳定性的判别方法是不不少的。用得较多的是“罗斯—胡

尔维茨 (Routh—Hurwitz) 准则”这种代数判据。在反馈系统方面，常用的还有奈奎斯特判据这种频率方法，以及波德图、尼柯尔 (Nichols) 图和根轨迹法等几何方法。还有苏联的米哈依洛夫 (Михайлов) 判据、D—域划分方法等。它们分别具有自己的特点与适用的条件。这些方法不仅用来判别稳定性，还可根据曲线的性状和特征根的分布来分析系统的一些其它性质，如动态品质、计算过渡过程的曲线等等。

非线性系统的分析方法

前面已经提到，对于非线性系统除了线性化以外，还有一些专用于非线性系统的分析方法，它们一般都是些近似的方法。

对于满足某些条件的一类特殊的非线性系统（例如当其非线性环节具有时不变的性质，输入为正弦信号，输出也是周期函数等），可以采用与频率特性相似的“描述函数”方法。这是一种常用的近似方法。此外还有摄动法、“相平面”方法等，各自适合于相应的条件。电子计算机对于非线性系统的近似计算来说，是一种有效的工具。

对于非线性系统的稳定性的分析，也没有通用的方法。在这方面比较完整的理论与方法有李亚普诺夫 (Ляпунов) 的稳定性理论。早在1892年，李亚普诺夫根据拉格朗日所确定的物理系统平衡的稳定性原理（即位能最小的点对应于稳定的平衡点），给出了稳定性的一般定义和两种判别方法。李亚普诺夫第一法是用级数展开来近似地表示非线性方程，然后求其近似解。这是非线性化的一种方法。李亚普诺夫第二法则不通过解方程，而是找出一种李亚普诺夫函数，然后用这个纯量函数来判别稳定性，故又称直接法。这种方法对非线性系统也适用，它在现代控制理论中有重要的应用。这是因为非线性系统和时变系统的状态方程是难以求解的，而且其稳定性往往与外界条件有关，很复杂，用直接法就方便得多。由于计算机的使用，可以避免用试凑法去找李亚

普诺夫函数，这就大大提高了效率。

二、现代控制理论

通过上述的简略论述，我们可以认为经典控制理论的早期形式就是伺服机构理论。这时的控制系统比较简单，所建立的微分方程一般是可以通过手算来求解的。到第二次世界大战前后的30至40年代，由于自动化和军备竞赛的要求，使控制系统日益复杂，手解微分方程遇到困难，因此，传递函数这种时域方法逐步转变为频域方法，即频率响应法与根轨迹法，以便直接分析系统的特性，摆脱手解微分方程的困难。但这种控制理论仍属于伺服机构理论的范围。一直到1948年以后，控制论的理论与方法运用到了工程技术方面，并于1954年出现了工程控制论，这才开始了真正的工程控制论的经典控制理论阶段，其时间是在本世纪50到60年代。

60年代前后，主要由于空间技术的进展，如导弹、人造卫星的研制，对自动控制提出了高性能、高精密度的要求。由此，工程控制论的研究对象发生了变化。它必须从理论上与方法上研究和解决多输入、多输出的控制系统，参量随时间变化的时变系统以及非线性系统；而且还要解决最优化以及如何适应环境变化的问题。为了解决这些问题，不仅传递函数这种时域方法不够用了，而且频域法也不适用了。新的问题要求工程控制论有新的概念与方法。

1960年前后，形成了现代控制理论。主要标志是卡尔曼(Kalman)提出了状态空间方法和能控性与能观测性等新概念。再就是与最优控制有关的庞特里雅金(Понтрягин)等人提出的“极大值原理”和贝尔曼的“动态规划”方法等。这些概念与方法广泛地应用了数学工具，特别是加强了对电子计算机的利用。

现代控制理论的基本内容是：以状态空间方法为主的线性系统分析、最优控制、自适应、自学习和自组织系统、状态滤波器理论、系统辨识等。我们只简略地说明状态空间方法和能控性，能观测性这些基本概念。

状态空间方法

状态、状态变量和状态空间的概念以及相应的某些方法在分析力学、热力学、统计物理与量子力学中是早已有所运用的。在经典控制理论中，当二阶的非线性系统不明显包含时间变量时，可以用几何作图的方法将其运动状态在“相平面”上描绘出来，这里所说的“相平面”就是“状态平面”。因此，在经典控制理论中也是使用了状态概念的，不过还不是一种主要的方法。在现代控制理论中，这种方法被加以推广和发展并成为一种主要的有效方法。

在现代控制理论中引入“状态”概念，实际就是说，我们不再把一个系统看作是一个黑箱，不再只考虑输入与输出，而是要考虑系统的内部状态。在经典控制理论中，研究的是简单的单变量系统，因此，根据输入与输出的关系进行线性分析还是可能的。对于复杂的控制系统来说，这就显得不够了，必须把状态变量考虑在内。对于这点，我们用黑箱——灰箱——白箱的理论是不难理解的。

从数学方面来说，任一控制系统一般是能用任意阶的微分方程来描述的。系统越复杂，微分方程的阶数一般就越高。对于多输入、多输出的系统来说，由于关系复杂，只有引入状态变量才能使方程的阶数降低。如果我们运用数学技巧，适当地选择状态变量，就能将高阶微分方程用微分方程组表示出来。阶数越高则微分方程的个数就越多，在数学上就可以用矢量与矩阵来表示。在控制理论中，这样就便于描述多输入与多输出的多变量系统。

现在我们先用一个简单的例子来说明上述的优点与意义。

例：将下图所示的LRC串联电路看作一个系统，求其状态方程和输出方程：

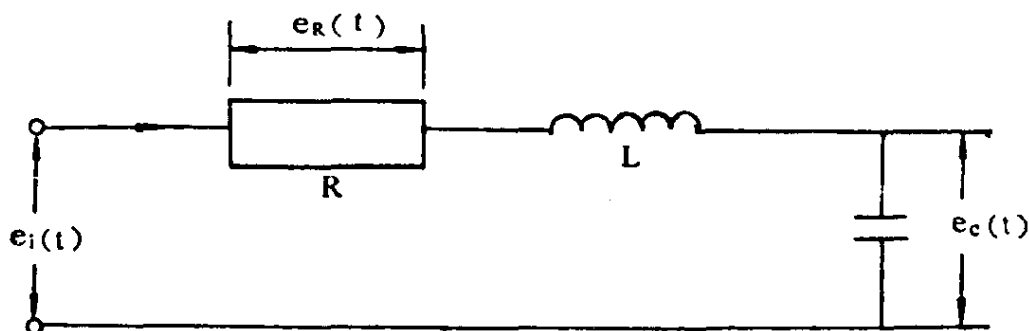


图4·14 LRC串联电路

由前述R、L、C三种元件物理特性的微分方程式，可得LRC串联电路中电流与电压的关系式如下：

$$L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) + \frac{1}{C} \int i(t) dt = e_i(t)$$

式中 $\frac{1}{C} \int i(t) dt = e_c(t)$

仍用以前的符号：输入变量 $x(t)$ 、输出变量 $y(t)$ 。另以 $S_1(t)$ 、 $S_2(t)$ 表示两个状态变量。

现选择两个状态变量 $S_1(t)$ 、 $S_2(t)$ 分别为 $q(t) = \int i(t) dt$ 和 $i(t)$ 。则：

$$x(t) = e_i(t)$$

$$y(t) = e_c(t)$$

$$S_1(t) = q(t) = \int i(t) dt$$

$$S_2(t) = i(t) = \dot{q}(t) = \dot{S}_1(t)$$

由上，经整理后可得：

$$\dot{S}_1(t) = S_2(t)$$

$$\dot{S}_2(t) = -\frac{1}{LC} S_1(t) - \frac{R}{L} S_2(t) + \frac{1}{L} x(t)$$

$$y(t) = \frac{1}{C} S_1(t)$$

这可表示为矢量形式：其状态方程和观察（或输出）方程分别为：

$$\begin{pmatrix} \dot{S}_1(t) \\ \dot{S}_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{LC} & -\frac{R}{L} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_1(t) \\ S_2(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{1}{L} \end{pmatrix} x(t)$$

$$y(t) = \begin{pmatrix} \frac{1}{C} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_1(t) \\ S_2(t) \end{pmatrix}$$

若令：

$$S(t) = \begin{pmatrix} S_1(t) \\ S_2(t) \end{pmatrix}$$

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{LC} & -\frac{R}{L} \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} 1 \\ \frac{1}{L} \end{pmatrix} \quad C = \begin{pmatrix} \frac{1}{C} \\ 0 \end{pmatrix}$$

则状态方程为：

$$\dot{S}(t) = AS(t) + Bu(t)$$

观察（或输出）方程为：

$$y(t) = CS(t)$$

如果将电阻 R 两端 e_R 也作为输出, 令

$$y_1(t) = e_R(t)$$

$$y_2(t) = e_0(t)$$

则输出方程为:

$$\begin{pmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & R \\ \frac{1}{C} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_1(t) \\ S_2(t) \end{pmatrix}$$

上式表示输出是多变量($y_1(t)$ 与 $y_2(t)$)的, 并描述了输出与状态的关系。

由上面例子可以知道, 利用状态变量, 可以便于描述多变量系统, 也可以描述高阶微分方程, 在经过一定的处理后, 可变换为等价的一阶微分方程组, 以便使用矩阵代数进行运算, 这就便于用计算机进行了。

通过上面的例子, 我们可以说明状态空间的概念并给出状态方程式的一般形式:

多变量系统可用下图表示:

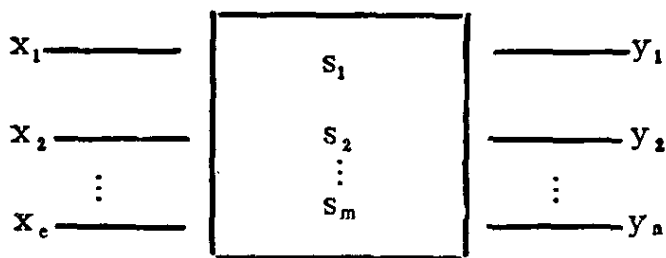


图4·15 多变量系统的状态变量表示

上图所示的多变量系统有 e 个输入变量 $x_1, x_2, \dots, x_e$; m 个状态变量 $s_1, s_2, \dots, s_m$; n 个输出变量 $y_1, y_2, \dots, y_n$ 。它们分别可以用矢量表示:

输入矢量: $X = \{x_1, x_2, \dots, x_e\}$

状态矢量: $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$

输出矢量: $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$

或写成下列矢量的形式:

$$X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_e \end{pmatrix} \quad S = \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_m \end{pmatrix} \quad Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix}$$

这个多变量系统共用 $l + m + n$ 个变量来加以描述, 这系统的任意一种状态是 $l \times m \times n$ 种状态中间的一种, 也可以看作是 $l + m + n$ 维空间中的一点, 这个多维空间就称为这个多变量系统的状态空间。

这个多变量系统作为一个动态系统, 有关的变量都是时间的函数, 所以是一种时域的方法。现设初始时刻为 t_0 , 在由 t_0 到某一 t 时的状态方程和观察 (或输出) 方程的一般形式如下:

$$\dot{S}(t) = F \{ S(t_0), X(t_0, t_0) \} \quad (\text{状态方程}) \quad (4 \cdot 13)$$

$$Y(t) = G \{ S(t_0), X(t_0, t_0) \} \quad (\text{观察方程}) \quad (4 \cdot 14)$$

我们不妨将这两个方程与第二章第四节中关于有限自动机的框图、定义与有关方程加以比较, 可以看出其形式上的相似性, 这种相似反映了这两者的内在联系。在 (4·13) 与 (4·14) 两个式子中的函数 F 、 G 都是单值函数, 这与有限自动机定义中的 λ 、 δ 两个函数也是对应的。

将 (4·13) 与 (4·14) 用微分方程表示为:

$$\dot{S}(t) = F \{ S(t), X(t) \} \quad (4 \cdot 15)$$

$$Y(t) = G \{ S(t), X(t) \} \quad (4 \cdot 16)$$

当系统是线性的时, (4·15)、(4·16) 分别为:

$$\dot{S}(t) = A(t)S(t) + B(t)X(t) \quad (4 \cdot 17)$$

$$Y(t) = C(t)S(t) + D(t)X(t) \quad (4.18)$$

当 $S(t)$, $X(t)$, $Y(t)$ 分别为 m, l, n 阶矢量时, 则 $A(t)$ 是 m 行 m 列矩阵, $B(t)$ 是 m 行 l 列矩阵, $C(t)$ 是 n 行 m 列矩阵, $D(t)$ 是 n 行 l 列矩阵, $A(t)$, $B(t)$, $C(t)$, $D(t)$ 分别为系数矩阵、控制矩阵、输出矩阵、直联矩阵。它们随时间变化时称变系数系统, 即时变系统。当系统的特性不随时间变化时, $A(t)$, $B(t)$, $C(t)$, $D(t)$ 都是常数, 可用 A, B, C, D 代替, 称为常系数系统, 即时不变系统或定常系统。即:

$$\dot{S}(t) = AS(t) + BX(t) \quad (4.19)$$

$$Y(t) = CS(t) + DX(t) \quad (4.20)$$

(4.20) 式中 $DX(t)$ 表示通过直联矩阵可将输入与输出直接联系起来, 在一般的控制系统中, 大多是 $D = 0$, 这就得到我们常用的方程式如下:

$$\dot{S}(t) = AS(t) + BX(t) \quad (4.21)$$

$$Y(t) = CS(t) \quad (4.22)$$

其中(4.21)式是状态方程, 它具有微分方程的形式(用矢量和矩阵表示的), (4.22)是观察方程, 它是代数运算式。因为将状态变量作简单变换后就可求出输出变量。所以一般常把这两个方程一起称为状态方程式。

以上简略地说明了状态空间概念及其方法, 这是现代控制理论的主要方法, 它不仅适用于复杂的线性系统, 而且可以推广应用于非线性系统、时变系统以及稳定性的分析与研究, 并且便于计算机的应用, 所以它是一种很重要的方法。

能观测性和能控性

状态空间方法与能观测性、能控性的分析和研究也是密切相关的。

对于一个控制系统来说, 如果我们已知其状态方程与输出方

程，那么就会产生这样的问题：在对输出经过一段适当时间的观测之后，能否据此得知这系统的状态？其次，如果我们知道了系统的状态，那么，当我们加入适当的输入之后，这个系统能不能达到我们所预期的状态？前一个问题是能观测性问题，后一个问题是能控性问题。

显然，对于一个控制系统来说，能观测性与能控性是必要条件，否则就难以进行控制。在经典控制理论中，因为研究的是简单的单变量系统，而且一般又不考虑系统的状态而只把系统看作黑箱，所以这两个问题的重要性显得不突出。但是在现代控制理论中，要研究比较复杂的多变量系统，这两个问题就必须考虑了。卡尔曼最早提出了这两个概念，同时也提出状态空间方法，并说明了它们之间的内在联系。对于一控制系统，在求得其状态方程后，就要根据这些方程确定其能观测性与能控性，否则是没有意义的。因为只有在满足了这两个条件后，才谈得上这个系统是否稳定的问题。

我们从直观上来说明一下这两个概念。如下二图所示。

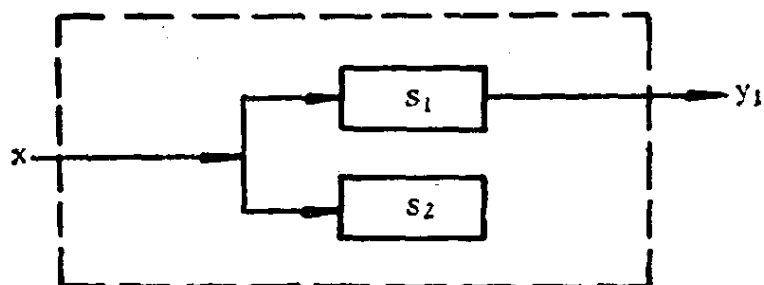


图4·16 不能观测的系统

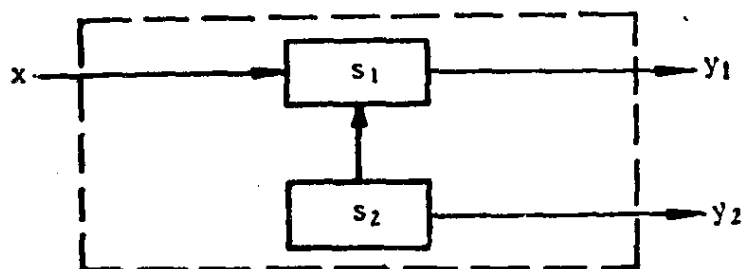


图4·17 不能控制的系统

在图4·16中，因为输出 y 没有包括状态 S_2 的信息，所以对这系统的输出 y 观测一段时间（如从 t_0 到 t_a ）之后，是不能知道这系统的状态 $S(t)$ 的。再看图(4·17)，因为状态 S_2 完全不受外界输入 X 的影响，因此，即使输入一个输入序列，也无法使这系统达到预定的状态。所以，从直观上可以很粗略地把能观测性理解为，根据系统在适当期间的输出，是否能以所需的精度来测定系统内部的状态或反应的问题，而能控性则是指用现有的控制手段（如输入），能否对系统施加影响到所需要的程度问题，也就是我们能否通过控制使系统达到预定目标的问题。

在现代控制理论中，给出系统的状态方程式以后，可以推导出完全能观测和能控制的充分必要条件，并有一些具体的判定方法。对此我们从略，对这方面有兴趣的读者可以参阅有关的教材或专著。

根据能控性和能观测性的概念，可以证明任意一个线性系统都可以分解为能控又能观、能控不能观、不能控能观、不能控又不能观的四种子系统。用传递函数等有关方法所能分析与处理的只是其中能控又能观的子系统。其余三种子系统中的隐蔽振荡等现象用传递函数方法来分析与处理就很困难。因此，判别问题是个很重要的问题。

稳定性

对于一个控制系统，尤其是复杂系统，首先要判别其是否具有能控性和能观测性这种重要性能。接着是要研究它的稳定性问题。对于多变量的、时变的、非线性的复杂系统来说，稳定性的分析当然也困难得多。前面已指出，对稳定性问题，李亚普诺夫的稳定理论，特别是他提出的直接法是一种重要的方法与工具。

早在1892年，李亚普诺夫就从数学理论方面给出了研究稳定性的一般方法。在现代控制理论出现以前，因为研究的主要是线性的、时不变系统的稳定性，起作用的是另一些方法和判据。随

着现代控制理论的出现与进展，才使得李亚普诺夫的理论和方法受到重视并得到广泛的应用。

李亚普诺夫是根据系统的输出（在控制理论中称为响应）是否有界来定义稳定性的。因为任一系统的稳定性问题，实际上就是扰动对于运动的影响问题。只要这种影响不超过一定的界限，就可看作是稳定的。他根据这个标准区分了三种情况：

1. 稳定的：对于系统初始值的一个扰动，如果其响应的幅值是有界的。

2. 渐近稳定的：对于系统初始值的一个扰动，如果其响应能够最终回到初始状态。

3. 不稳定的：对于系统初始值的一个扰动，其响应的幅值不是有界的。

这就是李亚普诺夫所定义的三种情况。可以用图表来表示。例如，一个用二阶常微分方程所刻划的控制系统可以用平面图形来表示上述的三种情况：

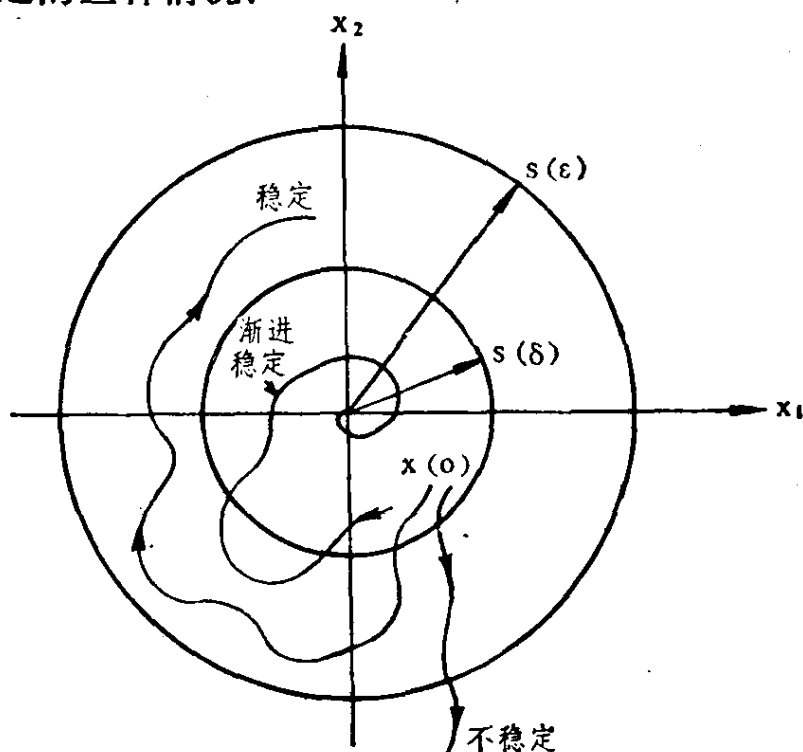


图4.18 二阶系统三种情况的图示

对于任意给定的正数 ϵ 为半径所作的圆 $S(\epsilon)$ ，若总能找到一适当的 $\delta > 0$ 为半径所作的圆 $S(\delta)$ ，当时间 t 无限增大，从 $S(\delta)$ 圆内出发用以表示系统响应的轨迹总不离开 $S(\epsilon)$ 圆内，则这个二阶系统是稳定的。当 t 无限增大，由 $S(\delta)$ 出发的轨迹不但不离开 $S(\epsilon)$ 圆，而且收敛于原点 $x = 0$ ，则这系统是渐近稳定的。若有某个 $\epsilon > 0$ ，则不论 $S(\delta)$ 的半径多小，由 $S(\delta)$ 出发的轨迹总能跑到 $S(\epsilon)$ 圆外，则这系统的响应就是不稳定的。

用数学语言可将这三种情况描述如下：

对于任意 $\epsilon > 0$ ，必有 $\delta > 0$ ，使 $\|x(0)\| < \delta$ 能保证 $\|x(t)\| < \epsilon$ ，则系统是稳定的。（ $\|x\|$ 表示状态向量到原点的距离，称为范数）。

对于任意 $\epsilon > 0$ ，必有 $\delta > 0$ ，使当 $\|x(0)\| < \delta$ 时不仅 $\|x(t)\| < \epsilon$ ，且 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|x(t)\| = 0$ ，则系统是渐近稳定的。

对于某一个 $\epsilon > 0$ ，无论怎样取 $\delta < 0$ ， $\|x(0)\| < \delta$ ，恒有 $t > 0$ ，使 $\|x(t)\| > \epsilon$ ，则系统是不稳定的。

在上图中，域 $S(\epsilon)$ 表示系统响应的边界。李亚普诺夫就是根据有界来区分这三种情况的。在这三种情况中，经典控制理论所研究的稳定性只限于渐近稳定，而把另两种都看作不稳定的。可见李亚普诺夫的稳定性概念具有一般的性质，他概括了线性及非线性系统等不同的情况。

不仅如此，李亚普诺夫还证明了由一般的常微分方程刻划的系统可以用两种方法分析其稳定性。

李亚普诺夫第一法：用近似级数表示非线性函数，然后用近似方法求解这非线性方程。

李亚普诺夫第二法：不必求解方程，而用一种叫作李亚普诺夫函数的纯量函数来判别系统是否稳定，并分析系统的响应。因不必求解方程，故称直接法。由于电子数字计算机可以找到所需的李亚普诺夫函数，还能找到系统的稳定区域，所以这种方法在

现代控制理论中得到广泛的应用。

最优控制

最优控制的研究在50年代已经开始，但真正受到重视和有较大进展则是60年代的事。现代控制理论所研究的是比较复杂的多变量系统，对其性能必然要更多地考虑最优化的要求。所谓最优，一般是指某一性能的指标为最优，不可能要求项项指标最优。对于某一性能指标来说，往往是要求达到这一指标的极小值，例如控制时间为最短，燃料消耗为最小，或控制误差为最小等等，所以，最优控制可以更确切地理解为一种极值控制。对此，李亚普诺夫以前，人们已经运用古典变分法进行了研究。60年代以来，人们还运用状态空间的概念和方法对此进行了研究。在现代控制理论中，庞得里雅金的极大值原理和贝尔曼等人的“动态规划”等方法，是最优控制的一些重要方法。

所谓最优控制，就是要选择一个信号区，将其输入到被控系统中去，使得系统的某一动态性能指标达到最优值，同时还要兼顾到 X 及状态变量 S 的限制条件。为了描述系统的动态性能指标，引入一目标函数 J ：

$$J = \int_{t_0}^T G[Y(t), X(t), r(t), t] dt$$

其中被积函数 G 称为损失函数，表示控制过程中所引起的各种损失，所以目标函数 J 也代表累积的损失。 $r(t)$ 是给定的一组值，输出值 $Y(t)$ 是跟踪 $r(t)$ 的。这样，最优控制就是在 X 和 S 的限制条件下，求出使目标函数 J 趋近最小值的 X 值，记为 X_{opt} 。

现设被控系统的状态方程为：

$$\dot{y}_i = f(Y, X) \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

要求目标函数：

$$J = \int_0^T G(Y, X, r, t) dt$$

能达到最小值。庞得里雅金的极大值原理是指能使 $J \rightarrow$ 最小值的 X_0 , 必须使得下述的标量 H 达到最大值:

$$H = \sum_{i=1}^n p f_i(Y, X) - G(Y, X, r, t_0)$$

其中

$$\dot{p}_i = - \frac{\partial H}{\partial y_i}, (i = 1, 2, \dots, n)$$

H 称为哈密顿函数, 这是一个辅助性的矢量。

极大值原理给出了达到上述要求的必要条件, 而不是充分条件。这个必要条件可以通过动态规划来求得。

动态规划是解决多阶段决策过程最优化的一种方法。这就是将一段时间划分成若干阶段, 如果对其中的每个阶段都要作出决策, 最后要求达到最优的效果。这样, 在各个阶段中所采取的最佳策略是与时间有关的, 故称为动态规划。这也是运筹学的一个组成部分, 我们将在下面有关章节再作简要的说明。在此只指出, 在控制理论当中, 当确定了最终的目标之后, 我们可以用把一个复杂的系统采取分阶段进行控制的办法, 以达到最终为最优的目的。这样, 现代控制理论与运筹学就都有必要来研究动态规划了。

状态滤波器

我们已经指出过, 在控制系统的分析与研究中必须考虑随机因素所起的作用。随机因素的不确定性又使得我们必须研究估计理论。估计理论一般是运用概率统计的工具, 在有噪声干扰的情况下确定或估计信号的量值。无论控制论还是信息理论都研究估计理论, 它与最优控制理论有密切的关系。滤波理论是估计理论的一个分支。

40至50年代, 维纳在研究预测问题时, 为了对控制系统的有关参数进行估计, 提出了维纳滤波器。早在30年代, 维纳和辛钦

分别提出各态历经定理（又称维纳—辛钦定理），为引入概率统计从事这一研究提供了理论根据。维纳运用概率论中的协方差函数描述了滤波器中的信号与噪声的统计特性。在滤波器的随机输入（包括信号与噪声）条件下，可以通过维纳—霍夫(Hopf)方程求解。这是一个积方方程，其解是维纳滤波器的最优冲击响应。以 $hopf(\tau)$ 表示维纳滤波器的最优冲击响应， $R_{yy}(\tau)$ 表示信号加噪声输入的协方差函数， $R_{yx}(\tau)$ 表示输入与期望输出的互协方差函数，则维纳—霍夫积分方程为：

$$R_{yx}(\tau) - \int_0^{\infty} hopf(\sigma) R_{yy}(\tau - \sigma) d\sigma = 0$$

因为这个方程的条件较严格，所以求解存在很大的困难。它要求将所用到的全部数据都存贮起来，在每一时刻通过对这些数据的运算，才能得到所需的各种估计值。这样，存贮量与计算量都很大，在使用计算机时也遇到较大的困难。

维纳滤波器的这些弱点限制了它的应用范围与价值。到50年代中期，空间技术日益发展，维纳滤波器的理论与方法也就越来越不适应实际的需要。

1960—1961年，卡尔曼和布西（Bucy）将状态空间方法引入到滤波理论中，并运用了一种递推滤波算法。这是卡尔曼滤波器理论的特点。状态空间方法的引入，使之能处理多变量系统的滤波问题，而且避开了解维纳—霍夫方程的困难，它给出的是一种类似于线性动态系统的状态模型，解其方程就容易得多；递推算法的引入还大大减少了计算机的存贮量与计算量，便于计算机的使用，这就适应了当时的需要，得到了广泛的应用。

卡尔曼滤波器在最优控制方面起到了很重要的作用。我们只能用方框图给予直观的说明。

一个带卡尔曼滤波器的最优控制系统可以用一方程组来表示：

$$\begin{cases} \dot{S} = AS + BX + W & (1) \\ Z = Y + v = CS + v & (2) \\ X = X(\hat{S}) & (3) \\ \hat{S} = \hat{S} \text{ (预估+修正)} & (4) \end{cases}$$

(1) 式为一控制系统的受控对象的状态方程式，用 W 表示随机噪声矢量，如飞行控制系统遇到的随机阵风等。

(2) 式为测量装置的方程，其中 $Y = CS$ 是输出方程， v 是测量过程中的随机噪声。 Z 是随机状态 S 的测量值。 S 和 Y 、 Z 都是时间的随机函数。

(3) 式是我们所要达到的目的，即求出输入 $X(S)$ 以实现最优控制。但因 S 是不确定的，只得用估算值 $\hat{S}$ 代替 S 值，要求 $\hat{S}$ 在统计意义上最接近 S 值。这 $\hat{S}$ 就是由卡尔曼滤波器给出的，其方法简单说来就是预估加修正，用(4)式表示。

上述方程组表示的系统用方框图表示如下：

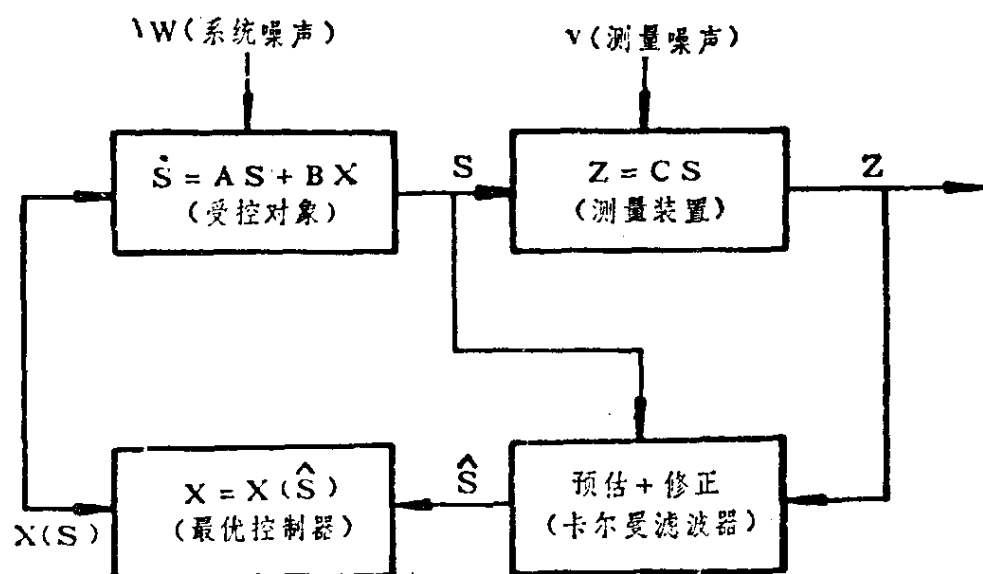


图4·19 带卡尔曼滤波器的最优控制系统

上图向我们直观地说明了卡尔曼滤波器的作用。关于卡尔曼

滤波器的数学表达式与技术内容超出了本书讨论范围，所以从略。

必须指出，现在对滤波器理论的研究已经较卡尔曼滤波器更为前进了。主要是研究非线性滤波及其一般的解法问题。

自适应、自学习和自组织系统

当系统的特性为已知时，一般是能达到最优控制的。即使系统的输入信号与噪声（或扰动）中具有随机的因素，也可通过状态滤波器进行滤波，以达到最优控制。这是在上面已经说明过的。事实上，系统与环境是相互联系着的，环境的变化往往要影响到系统的特性，而这种影响又不能事先知道，尤其对于复杂系统更是如此。这就提出了一项重大的任务，要研制自适应系统，以便能根据环境或其它条件的变化，自动调整有关的参数以持续保证系统处于最优状态。这种自适应系统的研究早在40至50年代就已经开始了，但当时只限于一些简单的极值控制系统（如自寻最佳点的系统）和条件反馈系统（如采用一些特殊的联结方法使系统对环境的变化不太敏感）等。60年代以后，随着现代控制理论的进展，自适应系统的研制才日益显示其重要性。

自适应系统必须包括两种功能：一种是要能够自动地测量和分析环境、对象的特性。这就是对于环境或对象的识别问题，这与系统辨识密切相关。另一种是决策问题，这就是根据所识别的信息作出决策，改变调节规律，以便保持系统的稳定与最优控制。无论是识别还是作出决策，都要进行计算与推断，这就要利用数字计算机来实现。

自适应系统大体上可以分为两类，它们都与识别和决策相关。一类是适应于环境变化或对象特性变化的系统。现用框图表示如下（见下页）。

另一类是模型参考的自适应系统。它除了起识别作用的比较器和决策器以外，还有一个供参考用的理想模型。通过系统与这

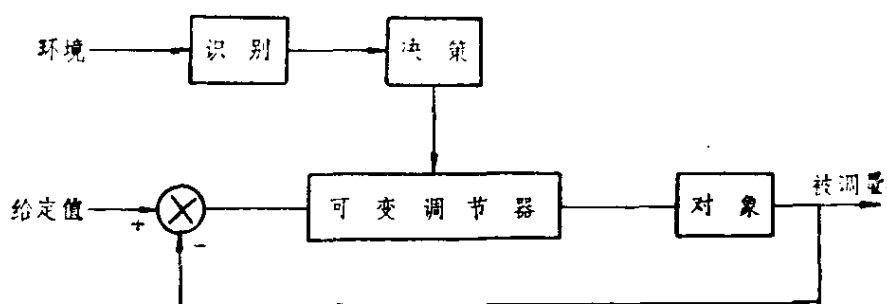


图4·20 根据环境变化的自适应系统

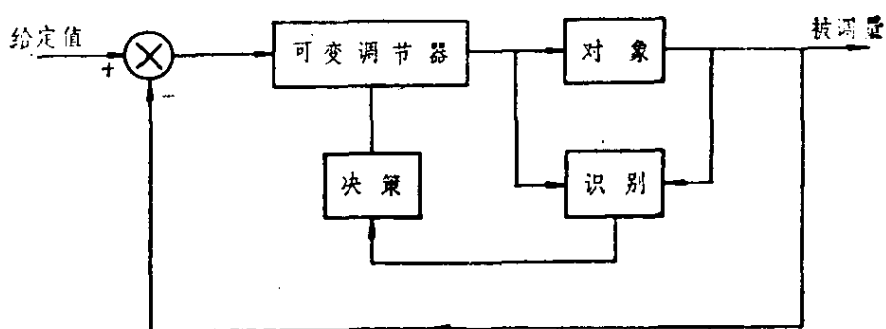


图4·21 根据对象变化的自适应系统

个模型的比较使之具有适应的功能。其框图如下：

在自适应系统中，模型参考系统是研究得比较成熟的一种，在飞机的自动驾驶仪、空间飞行器姿态控制等的设计中都有着广

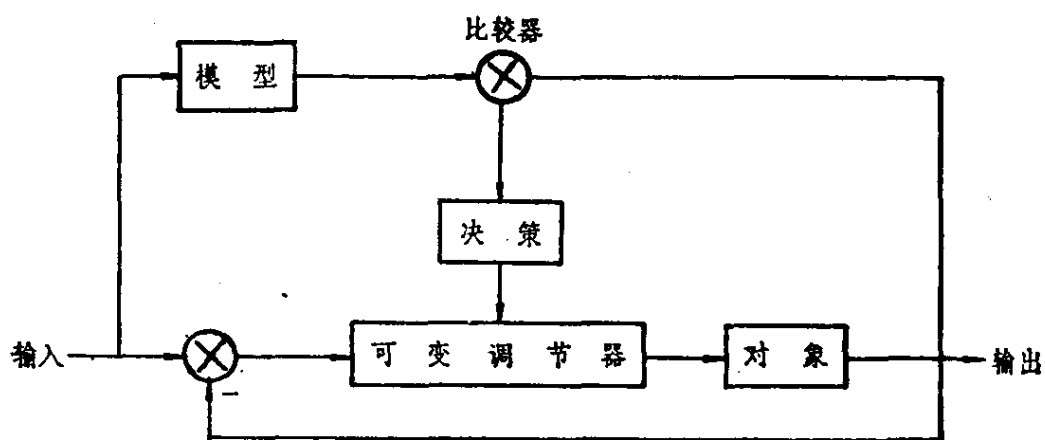


图4·22 模型参考的自适应系统

泛的应用。

自适应系统的进一步发展，出现了自学习系统。人们在设计这种系统时，不必知道有关控制的确切算法，而只要给出达到这一算法的途径就够了，然后系统就能根据自己运转过程中的“经验”，不断修正与改进算法，使之达到最优或接近于最优的程度。以最简单的线性学习系统为例：

设有一受控对象，其状态可以用 n 个参数 $X_1、X_2、\dots、X_n$ 来表示。其控制是二值的，即要么开($c=1$)，($c=0$)，则线性模型可令其为：

$$f(X) = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n \quad (1)$$

$$\text{当} \quad \begin{cases} f(X) \geq a_0, & \text{取 } c = 1 \\ f(X) < a_0, & \text{取 } c = 0 \end{cases} \quad (2)$$

对于一个线性的自学习系统来说，可以先选定(1)式中的一组系数，并按(2)式进行控制。经过一段时间后，就能综合地选出一些目标参数，用来衡量控制行为的“好”与“差”。如果“好”，就加强原来选定的系数，否则就修正或改进系数。经过这样一段过程后，只要具有收敛性，有关的系数就能逐步达到最优或较优的程度。这就是一种“自学习”的过程。

在自适应系统与自学习系统的基础上，学术界将一些事先不能完全确定其控制环境与对象，也不确知其控制算法与条件，但能够通过自身的运转，逐步积累“经验”，改进控制以逐步达到最优或较优的系统，统称为自组织系统。例如，IEEE（美国电气及电子工程师学会）控制系统名词委员会认为：一个控制过程，能通过控制过程的发展过程中，从其输入和输出能观察到的信息，用于减少对系统进行有效控制的先验不确定性，那么就是一个自组织控制过程。自繁殖系统、自修复系统也属于自组织系统。这是冯·诺意曼首先提出的。在生物系统中尤为多见。

生物系统、尤其是高等动物都具有自组织的特性。以人脑为

例，现已证实，在人出生一年后，脑细胞数目不再增加。人的一生所接受的一切信息不可能预先存贮在脑内，也不可能预知。因此，脑实际上是通过接受输入信息，使神经元间的联结方式发生可塑性变化的一种自组织系统。

现代控制理论中所研究的自适应、“自学习”等系统不过是对生物系统中的自组织功能的一种技术模拟。近些年来，耗散结构、协同学与超循环理论对自组织系统理论又有重大发展。

三、大系统理论

我们已经知道，由经典控制理论到现代控制理论的进展，在研究对象上表现为由单变量系统发展为多变量系统，在研究方法上表现为由传递函数、频率法发展为状态空间方法和时域法；在自动化方面表现为由单机的自动化发展为机组的或联机的自动化。到了70年代，科学研究的进一步发展，迫切需要研究变量数目更大的多变量系统；自动化的发展也要求将大量的控制系统（包括单机的与机组的）组织起来，形成一定的、内部结构复杂的大系统，以便达到综合自动化的水平。这种高度的自动化还往往要用到智能控制。在这种情况下，现代控制理论就必然要进一步发展为大系统理论。

与此同时，在本世纪40年代形成与发展起来的系统工程（systems engineering）与运筹学（operational research），到70年代也有了很大的进展。这些技术科学所研究的对象往往也是一些规模巨大的、复杂的系统，在研究方法上也有一些共同的方面。于是，就出现了系统工程和运筹学与大系统理论相互渗透的趋势。关于什么是系统工程与运筹学，以及它们与控制论、大系统理论的区别与联系，我们将在第三篇中另行论述。在此，我们仍只从工程控制论的角度加以概括地说明。

在70年代，由于社会经济、科学技术和军备竞赛的需要，使得国际上对大系统的研究日益重视起来。1972年，在维也纳成立了国际应用系统分析研究所（IIASA），这已经是一个跨国性的研究机构，它研究与整个世界有关的一些大系统问题，如地球资源问题、能源问题、人口问题、生态系统和世界经济模型等。从工程控制论方面的研究来看，在1975年召开的第六届国际自动控制联合会（IFAC）的学术大会上，已有不少关于大系统的论文。接着，国际自动控制联合会在1976年召开了“大系统理论及应用”的专题讨论会。这表明大系统理论已在国际范围内受到充分的重视，而且它一经形成就迅速发展起来。这些事实表明，从一定意义上可以说，工程控制论在70年代进入了大系统理论研究的新阶段。

大系统及其控制结构

对于什么是大系统，至今没有一致公认的定义。顾名思义，大系统是规模巨大的系统。在现实生活中，我们离不开这些大系统，也就是说，我们是生活在这些大系统之中的，它们必然要成为我们的研究对象。在自然、社会与思维领域中，都存在着大系统。例如：在工程技术方面有大型联合企业的综合自动化与计算机控制系统，大型的信息处理系统，空间技术（如导弹、卫星、飞船、航天飞机）的控制系统等；在自然界中有生态系统及其有关的环境保护与污染控制，环境监视网，水源供应网，农田水利灌溉网，生物调节与控制系统等；在社会领域中有城市、农村建设与发展规划，管理系统，人口控制系统，国民经济计划管理系统，军事指挥系统；在思维领域则涉及智能控制系统，智能机器人，复杂的人—机系统等等。

这些系统有如下的一些特点：第一，规模庞大，主要指元件、部件多，包含着许多子系统。第二，结构复杂，主要指各元件、部件、子系统之间的联系复杂。第三，功能综合，表现为大

系统往往具有多个目标，其中的某些目标之间还可以是相互克制或矛盾的。第四，因素众多，主要指大系统所处的内外环境十分复杂，受到的干扰与影响多。所以，大系统往往是多输入、多输出、多干扰的多变量系统。在有的大系统中，不仅包含“物”的因素，而且包含“人”的因素，这类主动系统就更为复杂，往往带有不确定性。涂序彦就是根据以上四个特点粗略地给出大系统的定义的^①。

此外，大系统还有一个重要特点，就是在控制与管理之间很难找出一条明确的界限。因此，对于大系统的研究，既可以从控制的角度来分析处理，也可以从管理科学的角度来分析处理。前者与控制论有关，后者与系统工程、运筹学有关。在此，我们仅从控制理论的角度来说明大系统理论的基本内容。

从控制理论角度来分析，任意一个大系统的元件、部件与子系统都要为了实现一定的控制功能而构成一定的控制结构。它们大体上可以分为三类：

1. 多级（递阶）控制（multilevel hierarchical control）：例如，一个大企业的分级管理结构就是一种三级递阶结构。第一级是车间内部运用一些调节装置进行局部控制。第二级是工厂运用控制计算机进行全厂的生产调度，实现过程控制的最优化。第三级是公司的管理计算机，决定各厂控制计算机的最优化指标或策略，进行计划协调与组织管理。第一级称为局部控制级，第二级称为递阶控制级，第三级称为协调控制级。图示见下页。属于这一类的另一个典型例子是人的神经系统。其外周神经相当于局部控制级，直接控制着人体的各个有关部位。中枢神经系统分为低级部位与高级部位。脊髓是低级中枢，它由颈（8）、胸（12）、腰（5）、尾（1）等共31个神经节段构成，分别发出

^① 参看涂序彦：《大系统理论及应用讲座一——四》，载《信息与控制》1980年第1—4期。

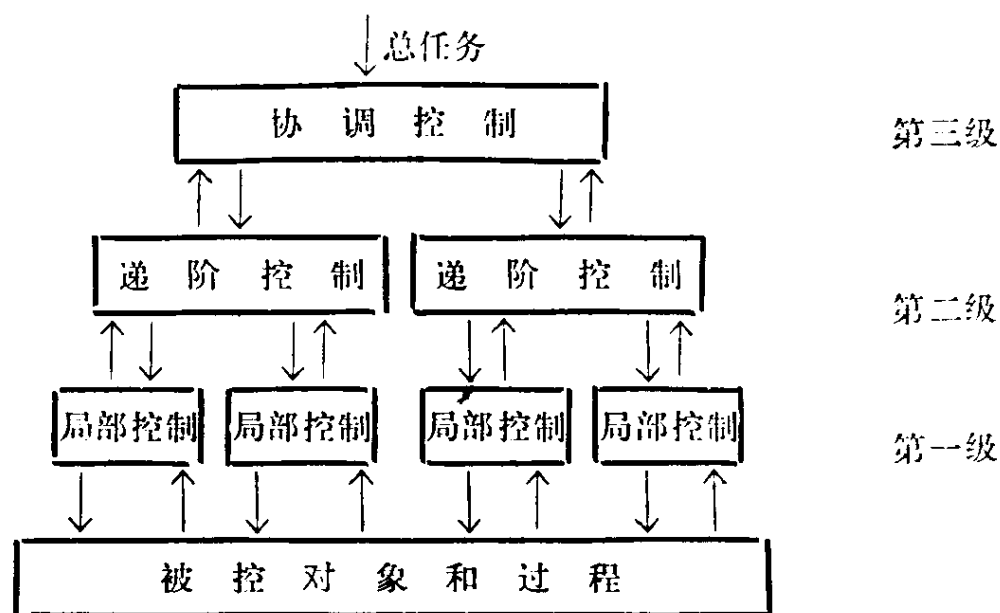


图4·23 多级（递阶）控制结构框图

和控制着相应的外周神经，成为递阶控制级。脊髓又受到延脑、中脑、桥脑、丘脑、大脑和大脑皮质这些高级中枢的控制，这些高级中枢总称为协调控制级。（当然，在这些不同的高级中枢之间还有不同的层次之分，存在着多种联系，在必要时，又可把它们分别看作不同的子系统或不同的控制级。可见，级别的划分具有一定的相对性，与所考虑的系统 and 条件有关。）

2. 多层控制(multilayer或multistratum control): 这种结构的一个突出特点是按任务或功能分层，在各层之间存在着不同的分工。一般说来，层次越高，任务或功能越复杂，干扰的变化也较慢；反之，低层的任务或功能较单纯，干扰的变化也较快。可用框图表示（见下页）。

图4·24描述了各层的任务与功能。需要说明的是自组织层是指由大系统的总目标、总任务与环境条件的变化（慢扰动）来制定决策，计划协调与组织管理的机构与功能。自适应层是指根据系统的运转情况采取相应的适应性措施，以保持系统最优运转的机构与功能。

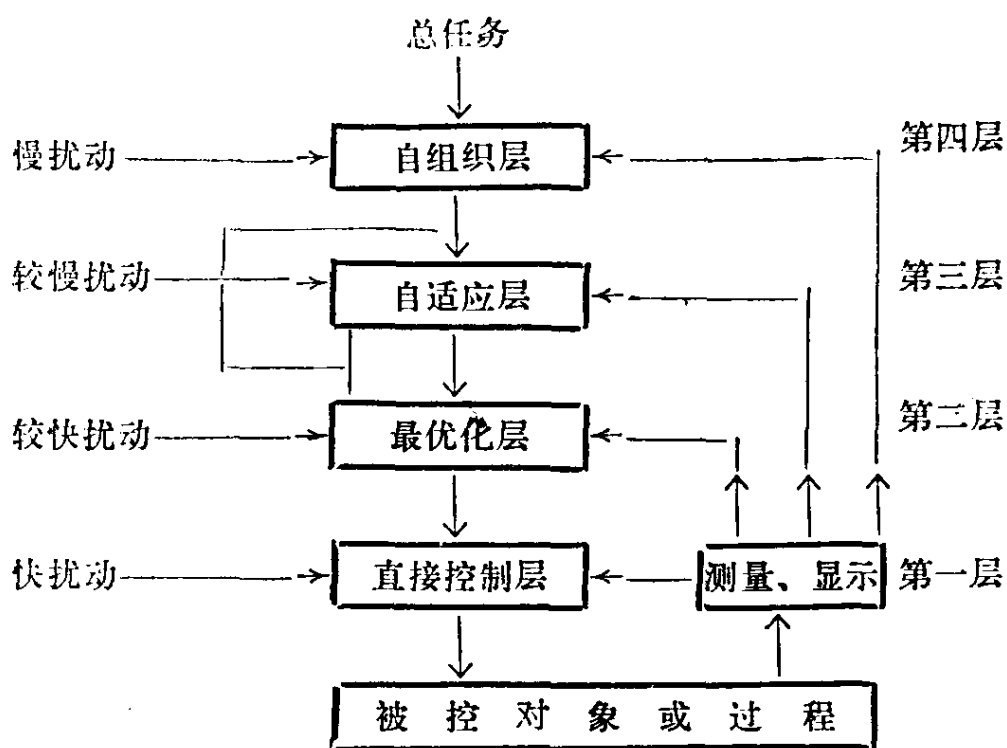


图4-24 多层控制结构

多层控制结构的一个例子是电力系统。为了保证安全供电，其任务往往分为预防层、恢复层和紧急层，以对付各种影响安全供电的扰动。

3. 多段控制结构：这种结构的突出特点是按被控对象的时序分段。例如，导弹的弹道可以分解为主动段、惯性飞行段和末制导段。

由以上三种结构，我们可以看出，对于任意一个大系统，一般都能按分级、分层、分段来加以分解。事实上，这就把任一大系统分解为一些不同的子系统。这些子系统之间形成一定的层次关系，表现出大系统内部结构的复杂性。这也是大系统的一个特点。

大系统的模型简化

控制论方法的一个特点是数量化。对于大系统来说，尽管因素多么众多、结构多么复杂，也必须进行定性与定量的研究，这

就要建立大系统模型。首先，要建立它的数学模型，用数学表达式来刻画系统的各种性能。其次，还要建立它的网络模型，为此，要作出必要的网络图、流程图、程序框图和计划评审图等。最后，还要建立物理模型。这是因为大系统往往与技术指标、经济效益和社会影响有关。分析与设计一个大系统，一般都要建立物理模型，以便进行大系统仿真。

在建立模型的过程中，逻辑方法起着很重要的作用。从控制论方法来看，一个大系统可能是黑箱、灰箱或白箱。在建立模型时，要根据不同的情况，运用演绎和归纳相结合的方法求出模型。

现在仅就大系统的数学模型来看，由于因素众多和结构复杂，使得即使是确定型的数学模型，其方程和阶数一般也是较高的，大大超过经典控制理论所常见到的二阶或三阶的范围，甚至可能达到几十、几百甚至上千阶的高度。同时出现的方程个数也可能是大量的。这些情况甚至使得高速度的计算机都无能为力。这就是系统（特别是大系统）数学模型的维数灾（curse of dimensionality）。因此，从60年代末开始，现代控制理论与大系统理论就不得不研究大系统模型的降阶问题，或称为模型简化问题。

模型简化的数学方法已有多种，主要的有两种。

1. 集结法 (aggregation method) :

这本来是在经济学中使用的一种概念与方法。所谓集结，通俗来说，就是加以集中、简化的意思。后来这种方法被移置到大系统的研究中。这种方法只适用于线性系统，它可将变量很多的大系统模型集结为变量较少的集结模型而保持系统的主要动态特性不变。

设一线性定常系统的高阶状态方程为：

$$\dot{S}(t) = AS(t) + BX(t) \quad (1)$$

$$Y(t) = HS(t) \quad (2)$$

其中 S 为 n 维状态矢量， A 为 $n \times n$ 阶矩阵。

用集结法要找到一低维模型：

$$\dot{Z}(t) = FZ(t) + GX(t) \quad (3)$$

其中 Z 为 l 维状态矢量，且 $l < n$ 。

为了使(3)成为(1)的集结模型，要求对所有的 t 存在关系式：

$$Z(t) = CS(t) \quad (4)$$

其中 C 称为集结矩阵。关系式(4)称为完全集结。

将(4)代入(3)式，可见，当且仅当矩阵方程

$$\begin{cases} FC = CA \\ G = CB \end{cases} \quad (5)$$

成立，才能达到完全集结。(5)称为动态吻合(dynamic exactness)条件。

可以证明，若 C 的秩为 l ， A 和 C 满足矩阵方程：

$$CA = CACT(C^T)^{-1}C \quad (C^T \text{表示} C \text{的转置矩阵})$$

则 $F = CACT(C^T)^{-1}$

这表示 F 是可以求出的，用类似方法也可求出 G ，则可求出集结模型(3)，使原模型(1)、(2)加以简化。

2. 摄动法 (perturbation) :

这是将原来的高阶方程中所含的小参数的摄动项设法加以略去，以便得到低阶的简化模型。所谓摄动，就是微扰在一个物理系统中，往往会存在一些小参数。例如，小的时间常数 τ_j 、小的质量 m 等，在数学上可以用某个小参数 ϵ 跟某一比例系数的乘积来表示 $\tau_j = k_j \epsilon$ ， $m_j = k_j \epsilon$ 等。这类小参数在整个系统中与一些主要的参数相比，是次要的，只起微扰的作用，但在有些情况下却不能不加以考虑。但把它考虑在内，又会增加方程的阶数。因此，在微分方程理论中就出现了一个分支，即用摄动理论来设法

将其阶数降低。摄动理论根据不同的情况与条件分为奇异摄动与非奇异摄动，它在力学中已经有所运用。随着大系统理论的发展，这种方法也被移置运用于模型的简化之中，尤其是其中的奇异摄动法。这些内容比较专门，在此从略。这里只指出，这种方法不仅适用于线性系统，也适用于非线性系统。对于宏观经济模型与微观经济模型的研究，奇异摄动法也是一种有用的数学工具。

大系统的特性分析与分解—协调方法

从控制理论的角度来看，大系统是多变量系统的变量数目增长和结构复杂化的结果。简单说来，大系统可以理解为变量甚多的多变量系统。因此，多变量系统的一些主要特性，如能观测性、能控性、稳定性、最优化等等，对于大系统来说也是同样应该加以研究的。现代控制理论的一些成果对于大系统理论来说原则上是适用的，但大系统理论又具有自己的特点，如模型简化问题，在大系统理论中的重要性就很突出。对于大系统的特性分析与处理，存在着一种重要的、通用的方法，这就是分解—协调方法。现结合大系统的最优化问题概略说明如下。

分解—协调方法的原理是很简单的。这就是化整体为部分，再将部分适当综合为整体。为了便于对大系统的某种特性进行分析，第一步是分解，就是设法把它划分为很多不同的子系统。这至少要注意到两个问题：第一，要把大系统的总目标函数，设法划分为各个子系统的目标函数的总和。一般来说，这是不太困难的。但是，大系统往往具有多个目标，因此，对于如何确定总目标函数以及如何进行划分，往往要进行具体分析处理。例如，要同时满足多个目标是困难的，但对多个目标予以兼顾却是可行的。从兼顾中找到一些比较适当的、甚至最优的兼顾方案也是可能的。特别是在多个目标中，很可能还会出现对抗性的，这时就可以用博弈论协助找出对策。因此，对于多目标的大系统说

来，难以作到最优控制，一般只要作到合理兼顾、保证重点就算满意了。这就是大系统的“次优化”（或“准优化”）问题。这是大系统理论在最优化问题上的一个特点。第二，要把大系统中的各级、各层、各段的各个系统之间的各种关系弄清楚，才能将一个大大系统适当地分解为很多不同的子系统。这就是模型关联的分解，这要比目标函数的分解复杂而且困难一些。可以说，大系统的分解，主要是系统模型关联的分解。

现令 $X(t)$ 、 $S(t)$ 、 $Y(t)$ 分别表示系统的输入、状态、输出的矢量， A 、 B 、 C 为常数矩阵，可设大系统的状态方程为：

$$\begin{cases} \dot{S} = AS + BX, & X(t_0) = X_0 \\ Y = CS \end{cases} \quad (1)$$

大系统最优化的总目标函数为：

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_1} [Y^T Q Y + X^T R X] dt$$

其中 Q 、 R 为常数矩阵。

若除 A 以外，矩阵 B 、 C 、 Q 、 R 均为“对角线型”，则表示各个子系统只通过状态变量而相互关联，则大大系统可分解为子系统目标函数的总和（ J 表示第 i 个子系统的目标函数）：

$$J = \sum_{i=1}^N J_i = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_1} [S_i^T T_i Q_i C_i S_i + X_i^T R_i X_i] dt$$

大系统的状态方程（1）可写成：

$$\begin{cases} \dot{S}_i = A_{ii} S_i + B_i X_i + \sum_{j=1}^N A_{ij} S_j \\ Y_i = C_i S_i \end{cases} \quad (i=1, 2, \dots, N)$$

式中的 A_{ii} 、 A_{ij} 表示 A 的子矩阵（ $i, j=1, 2, \dots, N$ ），

$\sum_{j=1}^N A_{ij} S_j$ 是状态变量的关联项。

由上可知，大系统可以根据总目标函数分解为 N 个子系统，

即 $J = \sum_{i=1}^N J_i$ 。当大系统的状态方程用子系统的状态方程来表示时，

其中就出现关联项 $\sum_{i=1}^N A_{ij} S_j$ ，问题是要处理这些关联项，以便求

出各个子系统的状态方程。这就要有一些数学方法来进行模型分解。

当一个大系统经过分解求出各子系统的目标函数与状态方程之后，如果阶数过高、方程过多，还要进行模型简化，才能便于特性分析与处理。

完成大系统的分解以后，就要在各个子系统局部最优化的基础上，通过协调来达到大系统的全局最优化。在这方面，大系统理论已经提出了一些协调原则和协调算法。

大系统的分解—协调方法不仅可以处理最优化问题，而且可以处理系统的其它特性。例如稳定性问题，也是先把大系统的稳定性分解为子系统的稳定性，然后找出大系统和子系统之间的稳定性关系，通过协调而解决大系统的稳定性。

分散控制 (decentralized control)

大系统由大量的元件、部件和子系统构成，往往分为很多层次。为了使大系统的整体功能充分发挥出来，就要考虑控制的方式。我们已经指出过，控制与信息是相关的，有效的控制不能不考虑信息的有效传输和加工。对于一个大系统来说，过分集中的控制势必带来信息传输的困难而使整个系统缺乏灵敏性。这个原则对于社会管理也是适用的。历史上有过这样一事实，南美洲的印加人在经济上、政治上和生活上都受到印加帝国统治者的高度集中而严格的控制，即使是些小事，也要请示最高统治者才能作出决定。可是，拥有20万军队的印加帝国，在这种集中控制

下，加上其他原因，竟被西班牙征服者比查罗（Pizarro）的168人的分遣队所打败。由此可见，对于大系统来说，集中控制常常并不是最优的控制结构，而分散控制日益受到人们的重视。

从工程控制论的发展过程来看，经典控制理论与现代控制理论都是属于集中控制的。对于规模不大、结构不太复杂的系统来说，集中控制是可行的，但对于大系统，对于综合自动化来说，它愈来愈显得不适用，这就必须加强对分散控制的研究。

分散控制的特点是没有单个集中的控制器或决策者、操作者，整个大系统的总目标是由一些分散的控制器或决策者、操作者来完成的。在他们之间可以有相互的信息联系，但没有统一的协调联系。所以这是一种无集中的控制。其框图如下：

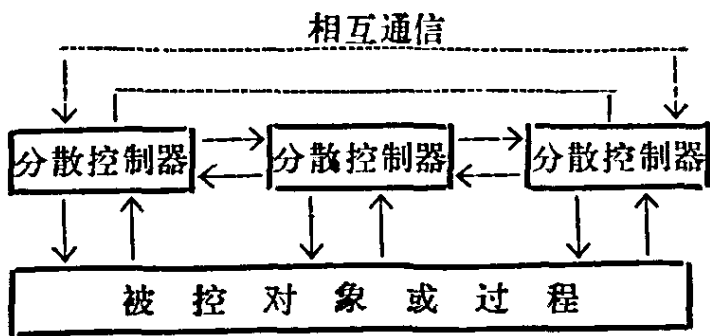


图4·25 分散控制结构框图

分散控制结构是广泛存在着的。一个典型的实例是大城市的交通管理，它不是通过集中的调度中心来指挥，而是由很多分散的交叉路口的交通岗来共同完成任务。就人体的神经系统来说，它既是一个分级控制结构，又是一个分散控制结构。例如人的膝跳反射就不是通过高级中枢，而是通过脊髓直接完成的。可见大系统的结构是多种多样而又十分复杂的，最优控制往往是与适当地处理好集中与分散的关系有关的。在这方面，也要运用数学方法来进行分析与定量处理，这就是所谓队理论（Team Theory）。

“队”，是指在一个系统中，有若干个控制者各自根据自己所获得

的信息以达到共同的目标，这种系统就称为队理论系统。队理论是研究分散控制系统最优化的一种数学理论。

四、模糊控制与模糊系统

大系统因素众多与结构复杂的特点必然引出它的另一个重要特点，即不确定性。不确定性又是多种多样的，如大系统理论之前就曾被研究过的随机性就是其中的一种。大系统理论的形成与发展，不仅更须加强对随机因素的研究，而且必须进一步研究另一种不确定性，即模糊性（Fuzziness）。国内也有人将 Fuzzy 译为弗晰、赋晰，不分明的，等等。模糊性与随机性虽同为不确定性，但两者互有区别。随机性的不确定性是就事件的发生与否而言，事件本身则是确定的。用概率论的语言来说，就是随机事件的样本空间是确定的，至于那一个随机事件在某个具体场合下是否出现则是不确定的。一个最简单的例子就是扔钱币，钱币只有正反两面，这是确定的，但在扔的过程中哪一面出现则是不确定的。但是随着扔的次数增加，正反两面出现的概率值都愈来愈趋近二分之一，因此它又是具有规律性的。这种规律不是决定性规律，而是统计规律。模糊性则不同，模糊事件本身就是不确定的。例如，不同颜色之间的边缘分布几乎无法找出它们确定的界限。可以说，模糊性就其本性来说是模糊不清的，它是不确定性中的一种。

随着大系统研究的进展，学者们越来越感到要对大系统给出精确的模型并加以精确的处理是很困难的。正如模糊集合概念、模糊数学的创始人、美国的控制论学者查德（L. A. Zadeh）所指出的：“当系统的复杂性日益增长时，我们作出系统特性的精密然而有意义的描述的能力将相应降低，直至达到这样一个界限，即精密性和有意义（或适当性）变成两个互相排斥的特

性。”^①他把这称为“互克性原理”。这是因为在大量的元件、部件和子系统之间，它们联系的复杂性必然要表现为多种不同的确定性，除了随机性以外，不能不考虑模糊性。同时，在大系统中可以出现人的因素，有的文献中将这种系统称为主动系统，而在主动系统中人的感觉、知觉与思维往往具有模糊性。只要分析一下，我们所使用的一些概念，尤其是在自然语言中使用的概念，以及使用这些概念所作出的判断与推理一般都具有模糊性。至于逻辑学中所研究的概念、判断与推理，都是经过科学抽象才具有精确性的。

正是为了解决控制理论、大系统理论以及人工智能等学科中所出现的模糊性问题，1965年，查德提出了模糊集合 (Fuzzy Sets) 概念，从此出现了模糊数学。尽管至今对这一学科的一些问题还有分歧意见，但它已渗透到一些数学的分支，并对当前科学技术的研究发生了重大的影响。事实已经表明，它是处理客观事物的某些模糊性的一种有效的数学工具。我们有必要简要地说明一下有关的基本概念。

在数学中，集合是一个重要的基础概念。虽然任意若干个（有穷或无穷多个）确定事物的全体可以组成一个集合，但在任一集合与组成这一集合的元素之间至少有一种性质，这就是：某一指定的元素要么属于这一集合，要么不属于这一集合。如果把前者与取真的值相对应，后者与取假的值相对应，就可与取真假二值的布尔代数、数理逻辑对应起来。这种要么真、要么假的性质只适合于确切性的描述和处理。查德为了描述和处理模糊性而提出的基本思想和方法，就是把“属于”关系进一步加以数量化。这

^① Zadeh, L. A., Outline of a New Approach to the Analysis of Complex System and Decision on Processes, IEEE transactions on Systems, Man and Cybernetics, SMC-3, 28—44.

就是说：某个元素并不是要么“属于”、要么“不属于”，而是可以在不同程度上“属于”某一集合。一个元素属于某一集合的程度为隶属度（membership grade），可以用相应的隶属函数（membership function）来描述，这在实际上是特征函数的一种推广。一个元素要么“属于”、要么“不属于”某一集合，这种性质是能用特征函数来描述的。当某一元素“属于”这集合，其特征函数值为1，否则就为0。现在，模糊集合的元素既可以在不同程度上“属于”某一集合（注意：这是一个正常集，正因为如此，严格说来，应称为模糊子集），则其特征函数值既不能为1，也不能为0，而应在大于0与小于1之间取值。这种特殊的特征函数就是隶属函数。

这样，查德就把普通集合论推广为模糊集合论。前者只取 $(0, 1)$ 二值，后者则可在 $[0, 1]$ 区间上取连续的无穷值；前者与二值逻辑对应，后者则与多值逻辑（取有穷的多值或无穷的连续值）相对应。通过这一推广，模糊集成为刻画模糊性的一种数学模型。

设论域 U 为一集合， $U = \{u_1, u_2, \dots, u_i, \dots\}$ ，它是所讨论的对象的整体。 $A, B, C, \dots$ 为 U 的子集， $P(u)$ 为其幂集，则 $u_i \in A$ 或 $u_i \notin A$ ，二者必居其一。

若将“属于”用函数表示，称为特征函数，记作 $C_A(u)$ ，其值域为 $\{0, 1\}$ ，则

$$C_A(u) = \begin{cases} 1 & \text{当 } u \in A \\ 0 & \text{当 } u \notin A \end{cases}$$

可见普通集合是与二值逻辑相对应的。查德将普通集推广为模糊集，用 $A, B, \dots$ 表示。（要注意的是模糊集是以集合 U 作为参考集的，所以严格说来，模糊集应称为模糊子集。）

例如，以年龄为论域，其值域一般取 $[0, 100]$ ，青年、中年、老年……就是其模糊子集。

查德的这一推广的要点可简述如下：

1. 将值域由取二值的 $\{0, 1\}$ 改为可取无穷连续值的 $[0, 1]$ 。
2. 将特征函数推广为隶属函数，用 $f_A(u)$ 表示，其取值为隶属度。
3. 模糊子集与从 U 到 $[0, 1]$ 的任一映射 $A: U \rightarrow [0, 1]$ 相对应。

由上，我们可用下图来表示与年龄有关的一些概念，如青年、中年、老年：

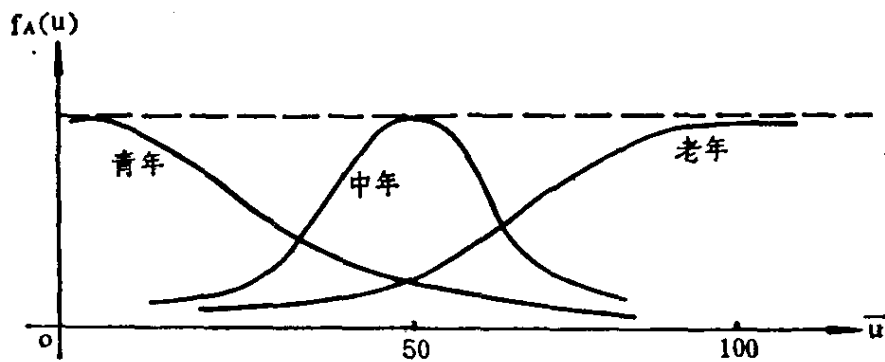


图4·26 青年、中年、老年的年龄划分示意图

图中，我们是取50岁的人作标准的中年人，由曲线可以看出，不到50岁和超过50岁的人，都只能有几分算中年人。这样，就把“中年”这个模糊概念用数量等级划分了。模糊集合与模糊数学为定量的处理模糊性提供了一种有效的工具。

将模糊数学（特别是有关的模糊语言、模糊逻辑、模糊算法等分支）运用于控制方面，出现了模糊控制的研究。1974年，马丹尼（Mamdani）首先发表了运用模糊数学原理进行自动控制的论文。为了实现对锅炉的压力和蒸气机的速度的模糊控制，他研究了一种模糊控制器，效果很好。这方面的研制工作以后不断得到推广。1977年佩比斯（Pappis）又用模糊控制方法进行了十字路口的交通管理试验，使平均等待时间比原来减少7%。这一试验已与大系统的研究相关。到1980年，人们已经开始对自组织模糊

控制器进行研究。这一年，我国的汪培庄、楼世博给出了模糊控制器的数学定义，并提出了可响应性等问题。查德在1971年就已经用状态方程形式描述了模糊系统。后来又有一些学者先后用抽象代数方法研究模糊系统，并对模糊系统的能控性与能观察性进行过讨论。

在此，我们不能对模糊控制与模糊系统的具体内容加以概述，而只指出，模糊控制与维纳所建立的信息反馈式的控制论在基本原理上是有所不同的。模糊控制主要是将控制者的经验加以整理与处理，归纳成一组条件语句，再用模糊数学的工具加以数量化，用模糊逻辑、模糊语言给出模糊算法，使得模糊控制器能够模仿人的操作策略，使计算机能接受模糊算法给出的控制指令。模糊系统的处理方法与确定性和随机性的处理方法也很不相同。这些都说明控制理论的研究途径正在不断扩展，这无疑是个值得重视的趋势。

第二节 生物控制论

生物控制论是控制论的一个重要分支。控制论作为技术科学是与生物科学相互渗透的产物，在其形成与建立过程中最早出现的两个分支，就是工程控制论与生物控制论。但是，生物控制论的产生不仅是控制论在生物学方面的应用，而且也是生物学自身发展的一种必然结果。

一、生物控制论的形成

随着近代科学的发展，产生了显微镜等各种生物实验仪器和生理与解剖实验的技术，在这种近代技术条件下产生了生理学与

神经生理学。它们的研究都涉及到人体控制系统，但在研究方法上，它们除了临床观察生理病理现象之外，还依靠大量的动物实验对有关系统的各个细节进行深入的研究。生理学与神经生理学是对动物与人体控制系统的具体结构形态较为细致的认识。它们虽然用的是一种分析的方法，带有那个时代的不可避免的形而上学性，但它们对人体控制系统的认识是必需的，它们所得到的一系列成果具有重要的科学价值。

在本书的第一章中，我们已简要地说明了生理学、神经生理学对动物与人体控制系统的一些重大研究成果，以及这些成果对于控制论的形成与产生所起的作用。这些成果也同时表明了，在控制论出现以前，生物科学已经开始对其有关的控制系统作了一定的研究，生物科学本身的这些进展必然促使生物控制论的形成与产生。正是在生物科学已有成果的基础上引入崭新的控制论方法与理论工具，才将二者结合起来形成生物控制论这一新的分支。

就动物和人体的控制系统来说，主要包括神经系统与体液调节系统，前者属于神经生理学的研究对象，后者属于生理学的研究对象，但也与神经生理学密切相关。关于神经调节的控制机制，本书有关章节已有了较多的说明。在此，只从体液调节系统的机制来看一下在生物控制论产生以前，生物科学本身对动物和人体控制系统的研究水平。

对于动物和人体的体液调节控制机制的研究，19世纪50年代末60年代初，法国著名生理学家 C. 贝尔纳 (C. Bernard) 特别注意这个问题，他指出动物躯体中的体液是保持躯体稳定性的条件，但他没有作出关于这种体液调节机制的详细说明。过了大约70年，也就是在本世纪30年代，才由美国生理学家坎农 (W. B. Cannon) 对具体的调节机制进行了实验的证明和理论的阐述。坎农把这种体液调节机制称为拮抗装置，并对它的机制进行了初步的定性和定量的描述，如下页图所示。

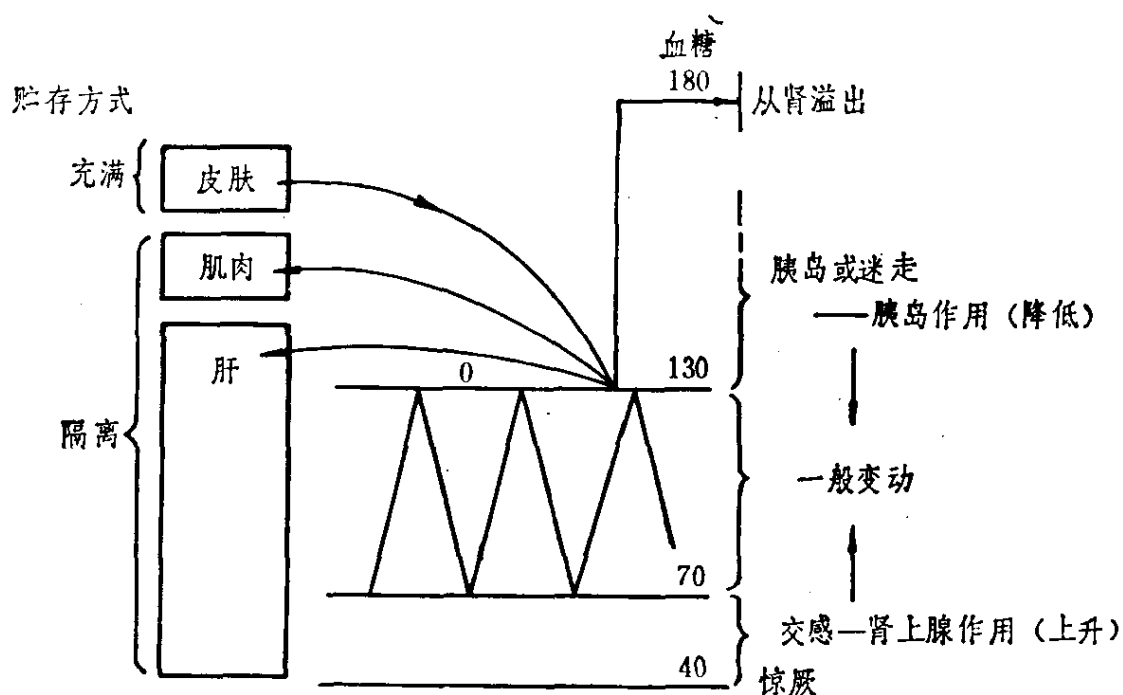


图4·27 维持血糖稳态的装置图

这个图说明了保持血糖稳态的两种拮抗装置的调节作用。糖在血液中的浓度有一个适当范围内的波动，这种波动是由升糖装置（交感—肾上腺装置）和降糖装置（胰岛装置）的调节控制来维持的。如果升糖装置失效，当血糖浓度下降到45%毫克左右时，有机体就会出现惊厥和昏迷；反之，如果降糖装置失效，当血糖上升到约180%毫克时，有机体内的糖就会进入肾小管而丢失。向这两个方向中的任何一个方向波动过大都会造成不良后果，但在正常情况下，这些不利的趋势都可以通过调节装置而得以避免，这些装置能在这种变动尚未过分发展之前对血糖浓度加以控制。

从上述这个例子可以看出，在控制论产生以前，生物科学对人体控制调节的研究已经取得了一些成果。这些成果说明了，生物科学特别是神经生理学的研究即便是在分析的时代也带有很大的综合性，这是由于人体这个系统的有机性和整体性的特点决定的。因此，生物科学自然成为控制论的一个重要理论前提，这是

毫不足怪的。但这只是问题的一个方面，控制论对于生物学不仅是“拿来”，而且要“给予”。从前面我们所讲到的坎农的工作可以看到：在控制论产生以前，生物科学中对人体调节控制系统的研究只是一个初步的定性定量描述，由于生物学本身方法上、手段上的限制，使这种研究很难进一步深入，而控制论的产生解决了生物科学中的一些难题，从理论上和方法上给生物学的研究开辟了一条新的途径。

1943年，麦克卡洛和匹茨将逻辑中的真假值与神经系统的“全或无”规律加以类比，使之对应起来，第一次以数理逻辑为工具，对神经系统的一些性质和特点加以形式化的描述，并建立了相应的数学、逻辑模型——神经网络模型。维纳则把这种神经元模型与电子计算机中的开关电路进行了比较，认识到神经网络是对人脑的结构与功能的一种简化的模拟装置，由此开辟了脑模型研究的途径，其后成为生物控制论的一个重要组成部分，即神经控制论，并与人工智能、仿生学密切相关。

维纳和毕格罗在研究预测飞机飞行曲线的火力自动控制装置时，深入研究了负反馈的行为，并通过请教神经生理学家认识到在人的随机行为中已存在着反馈不足和反馈过度的现象。他们由此得出了一个结论，认为生理学中的随意活动，即经过大脑皮层反射的、有意识的活动中的一个极端重要的因素，就是控制工程师们所谓的反馈作用。维纳认为，他的这一新观点标志着神经生理学的一个新阶段，这个新阶段的特点就在于把神经反射弧用反馈机制联系成了一个环状结构。它不仅涉及神经和突触的基本过程，而且涉及把神经系统作为一个整体的活动来理解。除此以外，罗森勃吕特和维纳等人还把负反馈机制引入到内稳态的概念中，提出了负反馈在内稳态调节中的作用，并指出了这种机制在病理学、医学中的实用价值。由此可见，控制论中关于反馈的观点，已经被用以说明生物控制的机制。生物控制的反馈机制成为

生物控制论的一个基本观点，生物控制论的很多实例是可以利用这一观点来加以说明的。

当然，生物控制论不能只满足于定性的解释，必须引入信息论的成果进行定量的研究。除此之外，由于生物控制系统往往具有多变量、非线性和大系统的特点，所以工程控制论中的现代控制理论和大系统理论的数学工具与计算机，就成为生物控制论研究的一种有力的工具。

由此我们看到，生物控制论与控制论的形成过程几乎是同时的，但一般认为在60年代前后，生物控制论才发展得比较成型。

二、生物控制论的研究对象与方法

生物控制论的产生虽然已经有了一段历史，但至今对它尚未有一个普遍公认的定义。维纳当初认为生物控制论的主要目的是构造人体和动物体的功能模型的理论，它为生物学和医学提供一般性的语言。后来，有人认为维纳的上述定义范围过于笼统和宽泛，认为它把数理生物学、理论生物学、生物医学等学科都包括在内了。因此，现在人们一般认为，生物控制论是研究生物系统中的信息传递、变换，处理过程和调节控制规律的科学^①。它着重研究的是生物系统的各组成部分及其与外部环境的相互联系和相互制约，并在这种关系中研究对象的运动规律。由于存在各种不同类型的生物，存在不同结构层次和不同功能的生物系统，所以生物控制论研究的具体课题是十分广泛的，但就其所研究的基本问题和研究的方法手段而言，则是比较一致的。

从研究对象上看，在50年代，控制论一般只能应用于简化

^① 参看汪云九：《生物控制论和生物信息论的一些情况》，载《生物科学动态》1980年第5期。

了的生物线性系统，初步解释了动物及人的体内稳定、生物自我调节控制问题。60至70年代以来，随着现代控制理论和大系统理论在生物学中的广泛应用，生物控制论的研究对象不断扩大，开始向研究更复杂、更综合的生物系统的方向发展，如对脑系统、生物大分子系统、个体发育、系统生物进化的研究。近年来，在生物系统的各个层次结构中，从分子水平到细胞器官水平，从个体到包括环境在内的生态系统都已发现存在着大量的负反馈机制，这些系统都是生物控制论的研究对象。可见，生物控制论的研究对象是一个十分广阔的开放性领域。

从研究方法上看，在50年代，一般是用“黑箱”方法来研究生物控制系统，由此得到生物系统的传递函数或给出等效的方框图。这种方法一般都限于对生物系统进行线性的描述，而生物系统极少是线性的，大多是非线性的，要把线性理论近似地应用于生物系统，则要受到许多条件的限制，甚至常常出现线性理论完全不适用于这些系统的情况。生物系统还有一个重要特征，那就是它们具有高度的复杂性，在复杂的生物系统中，变量的数目往往很大，例如人脑具有100亿以上的神经细胞，这完全是另一个数量级的数字，显然是一种大系统。因此，具有大变量的非线性控制理论在生物学中更适用。1960年，斯坦莱—约里斯(Stanley—Jones)发表了《论生命系统的控制论》一书，这本书研究了神经系统反馈的非线性问题，比较明确地提出了在生物系统中使用非线性控制理论的问题。维纳在《控制论》一书的第二版中提到过这本书，维纳认为这方面的研究会给生物控制论带来新的希望。与此同时，随着生物控制论的发展，以及非线性控制理论在生物理论中的应用，使人们越来越认识到，只研究生物系统的行为而不问其结构是不行的。所以，开始采用系统辨识，而系统辨识仅靠“黑箱”方法是不够的，人们又开始使用“灰箱”方法，这种方法更加符合生物系统的实际情况。

生物控制论由于研究对象的特殊性，所以它同一般控制论的方法相比，除了上述共性之外，还有自己的特性。

首先，生物控制论中最主要的问题之一是自组织和最优控制的问题，这是生物系统的特性，是生物系统长期进化的结果。当然，物理学、化学、工程技术中也有自组织系统和最优控制的问题，但它们的自组织系统的能力远远不及生物系统所具有的那种规模和程度。生物系统是一个极为复杂的、性能完善的多级结构的大系统，人们总希望通过对生物系统的研究，更好地认识这些原理。维纳在晚年就一直从事这方面的研究^①。自适应、自组织与系统的协调控制是分不开的，协调控制也是生物大系统的一个重要的特点。在协调控制的作用下，生物系统的各种功能可以大大地提高。如人手能够完成各种不同的技巧活动，主要是依靠了肌纤维和神经间的协调配合来实现的。人的肢体能够完成各种复杂的协调运动，主要是小脑在对支配各个肢体的神经的活动进行总的协调控制。人体感觉与内环境也存在着协调作用，似乎也存在着特殊的协调中心，这些协调中心在发挥系统的功能方面起着重要的作用。正是由于生物大系统在结构与功能方面的这些特点，决定了它的研究要有一些特殊的着重点和特殊方法，而这种研究又将对现代控制理论和实际应用的发展有所启发。

其次，生物控制论在应用控制论的方法时，非常强调控制论方法与生物学方法的结合。土耳其生理学家巴沙（Erol Basar）在《生物物理和生理系统分析》一书中，曾提出一个生物系统分析提纲（见下页）。

巴沙的这一生物系统分析提纲强调在研究一个生物黑箱时，除了应用一般的控制论和系统方法外，还应该运用一些生物系统的特殊方法，即强调控制论方法和生物学方法的结合。

^① 参看维纳：《我和控制论的关系》，载《自然辩证法研究通讯》1964年第2期。

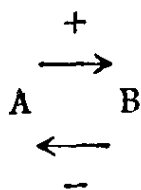
1.系统理论的抽象方法	2.生物系统的特殊方法
a.瞬态反应分析 b.频率特性法 c.瞬态反应—频率特性法 d.理论隔离法 e.时序分析（自相关，功率谱） f.非线性研究	a.使用药剂 1)系统选择阻断 2)系统的部分破坏 3)把系统归化为它的被动反应 b.把部分从系统中切除或去掉 c.走出系统

生物控制论研究对象和方法的上述特点，使得学术界对其体系与研究范围至今没有一致的看法。本书将根据一些论著的共同提法，大体上将生物控制论的研究内容分为以下几个方面来加以论述：

生物控制系统的研究

我们在这里讲的生物控制系统，主要是指生物有机体的个体层次，这个层次的生物控制系统主要包括：血压控制系统、呼吸控制系统、体温控制系统、神经控制系统、内分泌控制系统和肌肉运动控制系统等等。这些生物控制系统之间一个最共同的特点是它们都具有反馈控制机构，因此生物反馈控制是研究生物控制系统的关键。但生物控制系统中的反馈机制很复杂，有不同层次，也有不同类型，目前比较清楚的有三种主要类型：

1.由负反馈控制来保证的机能的稳定过程。在这个系统中，第一个器官（或者机能）刺激第二个，而第二个可以抑制第一个，这种反馈控制可以表示为：

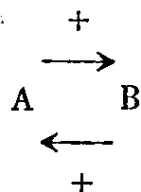


这种控制的典型例子是垂体与甲状腺的关系，垂体分泌促甲状腺素刺激甲状腺激素分泌；而当血液中甲状腺素增多时，反过

来影响垂体，抑制垂体分泌促甲状腺素，因此使血液中的甲状腺素维持在一定水平。

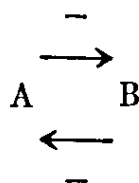
2. 进行性的增长及分化过程

正反馈控制起着重要作用，这种正反馈控制又可分为两种类型。第一种类型是控制者与控制对象相互促进，可以表示为：



例如，孕妇体内子宫与胎儿的关系。来自胎儿方面的刺激使子宫不断增长，而子宫也刺激胎儿的生长，两者互相促进。

第二种类型是控制者与控制对象互相阻抑，可以表示为：



例如睡眠抑制和感官、交感神经系统活动的关系。中枢神经系统疲劳引起的睡眠抑制，使感官、交感神经系统活动减少，由于感官和交感神经系统活动的减少更加深了睡眠抑制。

3. 二重选择的更替状态

这是正负反馈控制相结合的混合类型。例如，甲状腺激素控制调节系统就是一个正负反馈混合控制的系统。如图4·28所示^①，由下丘脑产生的TRF是促甲状腺素的释放因子，它通过门脉系统作用于脑垂体前叶，这样就使TSH即促甲状腺素增加，TSH通过血液作用于甲状腺，又刺激了甲状腺TH分泌的增加，而当血液中TH的浓度增加以后，反过来又抑制了下丘脑中TRF和脑垂体前叶中TSH的产生。这样一个由正负反馈混合控制的系统就维持了人体血液中甲状腺素的正常浓度。

① 涂序彦等：《生物控制论》，科学出版社1980年版，第184页。

这种对生物反馈控制机制的分类只是一种初步的定性研究。控制论应用于生物学之所以成功，关键在于它能建立生物控制系统的数学模型，对生物控制系统进行定量的研究。

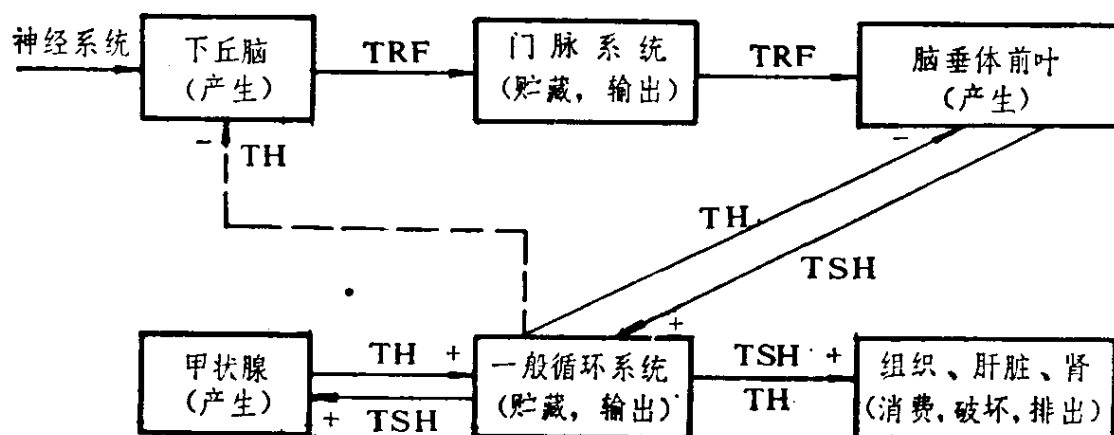


图4·28 甲状腺调节系统

在人们运用生物控制论建立生物控制系统的数学模型时，有各自的一些独特的方法。如：行为实验——观察被实验系统的行为、特点；心理物理实验——了解被实验系统如何回答提出的问题；生理实验——进行系统的变量测量^①。

仍从甲状腺素控制调节系统看，前面的甲状腺素调节系统的框图可以改写为下面的形式：

在图中， X_0, X_1, X_2 为系统的状态变量，

X_0 ——促甲状腺释放因子（TRF）的浓度；

X_1 ——促甲状腺素（TSH）的浓度；

X_2 ——甲状腺素（TH）的浓度。

S_0, S_1, S_2 为TRF、TSH、TH的基础分泌量。

$K_{12}, K_{10}, K_{12}, K_{21}$ 表示了变量 X_0, X_1, X_2 之间的相互关联。

① 参看郭爱克：《从第三届国际控制论和系统论大会看生物控制论的研究方向》，载《生物化学和生物物理进展》1976年第2期。

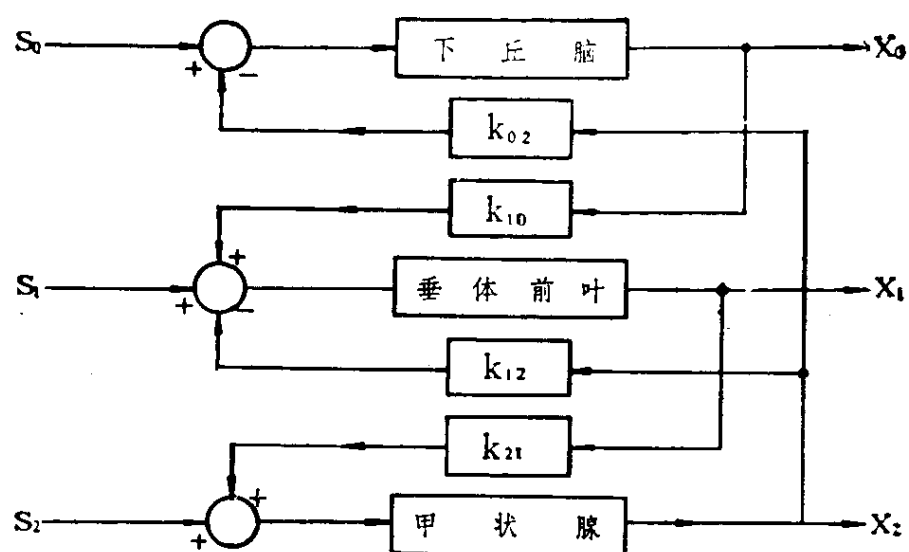


图4·29 甲状腺控制系统方块图

在线性化的条件下，下丘脑、垂体前叶和甲状腺三个环节的一阶微分方程分别是：

$$\frac{dx_0}{dt} + k_{00}x_0 = s_0 - k_{02}x_2$$

$$\frac{dx_1}{dt} + k_{11}x_1 = s_1 + k_{10}x_0 - k_{12}x_2$$

$$\frac{dx_2}{dt} + k_{22}x_2 = s_2 + k_{21}x_1$$

在方程中， k_{00} 、 k_{11} 、 k_{22} 分别表示下丘脑、垂体前叶和甲状腺的传递特性。

将上面三个方程联立并且整理，可以得到甲状腺控制系统的状态方程组：

$$\begin{cases} \frac{dx_0}{dt} = -k_{00}x_0 + 0 - k_{02}x_2 + s_0 \\ \frac{dx_1}{dt} = k_{10}x_0 - k_{11}x_1 - k_{12}x_2 + s_1 \\ \frac{dx_2}{dt} = 0 + k_{21}x_1 - k_{22}x_2 + s_2 \end{cases}$$

令状态矢量及控制矢量为:

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \quad \mathbf{s} = \begin{pmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \end{pmatrix}$$

状态矩阵及控制矩阵为:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} -k_{00} & 0 & -k_{02} \\ k_{10} & -k_{11} & -k_{12} \\ 0 & k_{21} & k_{22} \end{pmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

由此, 甲状腺控制系统的方框图可以表示为矩阵形式的状态方程^①:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{s}$$

这样, 就建立起了甲状腺素控制调节系统的数学模型。生物控制系统数学模型的建立, 大大方便了对生物控制系统的研究, 使人们对这种系统的认识进一步深化。

神经控制论

在本节开始我们就曾经指出, 动物和人体的控制系统基本上分为两大类, 一类是神经控制系统, 一类是体液调节系统。由于神经系统在脊椎动物机体的功能调节控制中起决定的作用, 所以在生物控制论中特别注重对神经控制系统的研究, 由此形成了生物控制论的一个重要分支——神经控制论。神经控制论主要研究动物及人体神经系统中信息传递、变换与处理等方面的问题。由于这些问题十分复杂, 神经控制论必须从不同方面, 通过多种方式对这些问题进行研究。

由于神经控制论是研究神经系统的控制调节问题的, 因此,

① 涂序彦等:《生物控制论》, 科学出版社1980年版, 第38—40页。

神经元模型和神经网络的信息处理能力的研究是神经控制论研究的一个最基本的方面。神经系统是由大量的神经元组成的，如人类大脑皮层就大约有100多亿个神经元，每个神经元都是一个复杂的信息处理单元。1943年，麦克卡洛和匹茨第一次提出了神经元的数学模型，从他们的工作开始到目前为止，已经提出了一百多种不同类型的神经元模型。另外，神经元不是孤立存在的，每个神经元都与许多神经元相互联接。在人的大脑皮层中，每个神经元平均又与1000个左右的神经元联接，由此构成一个复杂的神经系统控制网。因此，在对神经元进行研究的同时，还要对神经网络的信息处理能力进行研究。例如，曾有人对 36×36 个相同神经元随机联接组成的神经网络进行模拟，发现这一网络的动态过程的波形与人的脑电波相似，它可以帮助人们认识脑波产生的机理。目前，已经达到对2000个神经元组成的神经网络模型进行动态模拟的水平。

不论人体还是动物体，神经系统的控制中枢都在脑中，脑是神经系统最复杂、最核心的部分。因此，脑的信息处理系统的结构与原理是神经控制论研究的中心问题。

在40年代末到50年代初，人们是从生物的整体性功能上去模拟脑的活动的。1948年，艾什比写出了第一篇关于脑模拟的论文，题目为《设计一个脑》。艾什比认为，人脑之所以能够获得并处理信息，是由于人脑具有通过负反馈校正偏离中心最佳状态的能力，这样就能使人从十分复杂的环境中取得经验，找到适应环境的方式。他根据这种观点制作了由四个单元组成的稳态机。稳态机的每个单元的顶部都悬挂着一块磁铁，由电子管、继电器赋予四块磁铁以适应外界变化的能力，同时，这些磁铁自己组合成与之适应的具有稳态能力的结构。艾什比认为，这种具有负反馈的自适应能力就是“脑”的某种性质。

当然，艾什比的这种模拟还是非常初步的，它只是说明了生

物的一些功能是可以模拟的。到了50年代后期，出现了模仿神经系统局部结构与功能的感知机（perceptron）。1958年，罗森勃吕特根据神经元之间的突触导通能力可塑的假说，模仿神经系统信息处理的多层结构，以及每个神经元接受多个输入和神经元之间突触导通可变等特点，制造了一个通过学习能学会分类图形的装置。这种类似的装置还可以通过几小时的学习，学会可靠地区分潜艇和海豚发出的声响，这就是最初的感知机。它作为脑的模型比稳态机前进了一步，开始具有了“学习”这样一种自组织能力。人们把这一工作视为脑模型研究的真正起点。但是，由于感知机的识别能力有限，这类工作到60年代中期就较衰落了。

与此同时，由于电子计算机的发展，从50年代中期起，人们抛开了对脑的细微结构的模拟，而直接从脑功能的宏观角度，用特殊的所谓启发式程序模拟人脑的功能，如人如何下棋，如何证明数学定理等。这些研究统称为“人工智能”的研究，这种工作是60年代到70年代脑功能模拟的主流。在60年代中，又有人提出了小脑是一个特殊的感知机的设想。在这个基础上，迈雅（Marr）提出了“大脑新皮层”的理论，这种理论假设大脑皮层结构具有均一性，它是由基本操作组合起来的信息处理结构，它可以依据过去的经验去形成分类单元，并用这分类单元去辨别周围事物，外界输入信息要经过编码，这个编码也要通过学习来完成。这个理论还提出了一些预测，如它认为睡眠是形成新的分类单元的条件等。这种模型目前还处在设想阶段，有待实验证明。与此同时，日本的一些学者从脑的结构和功能两方面入手，也做了一些工作。如永野的自己成长学习机模型，中野提出的模拟人脑联想思维能力的联想机装置等。总之，目前神经控制论中对脑信息处理的研究，对脑模型的研究虽然仍较简单化，但它依然是我们研究脑信息处理，研究脑这个复杂的自组织系统的有效途径。所以，神经控制论还有待于进一步发展完善。

仿生学

仿生学不能完全归属于生物控制论，但同生物控制论密切相关，因此，我们在这里做一简要论述。

仿生学是1960年作为一个独立的研究方向产生的。1960年秋，在美国俄亥俄州召开了第一次仿生学讨论会，人们把这个时间定为仿生学正式诞生之日。

这次讨论会的口号是：“人造系统的活原型是新技术的钥匙。”这也是关于仿生学的最早定义。当时一般认为仿生学是一种将生物学理论和方法运用于工程技术的产物。杰克·斯蒂尔首先提出仿生学这个词，他将仿生学定义为“仿照活系统的，或在某种意义上表现活系统特征的，或那些与活系统相似的系统的科学”。^①更简单地说，仿生学是一门“模仿科学”，是工程技术装置对有生命物质的一种模仿。目前关于仿生学的定义有许多争论。有人认为应当把仿生学概括为模拟生物系统的信息加工、能量转换和力学结构，用以改进现有的工程技术系统的科学，这就是所谓的“广义仿生学”。有人认为仿生学主要研究有机体的信息加工和控制调节，用于改进工程技术系统，这就是所谓的“狭义仿生学”。由于对仿生学的性质看法不同，所以有人认为仿生学是控制论的一个部分，有人则认为它是一门独立的学科，有着更为广阔的研究领域，还有人认为它是工程控制论和生物控制论之间的一座桥梁。

仿生学之所以在60年代异军突起，是由于现代科学技术发展的需要。要使一个复杂的设备连续运动并且少出故障，就必须提高它们的可靠性。而生物原型在可靠性方面极为突出，并且还坚实紧凑、轻巧、耗能少，灵敏度高。同时，电子装置与电子计算

① D.S.哈拉赛：《仿生学的由来》，载《外国自然科学哲学摘译》，1975年第1期。

机的发展也使对生物系统的模仿成为可能。从科学发展的内在规律看，仿生学正是在知识日趋整合的基础上产生的。

仿生学方法一般是经过三个阶段来实现的：第一阶段，也称生物学阶段，这是一个预备阶段。这个阶段主要是根据所提出的任务用各种方法来研究活体对象的各个方面；第二个阶段是理论阶段，这个阶段要理解已获得资料，建立数学模型和揭示一定的规律。这个阶段反映着仿生学方法的主要特点。它揭示了用简单的方法模拟活体对象的复杂运动形式的可能性。第三个阶段是应用阶段，也称技术阶段。在这个阶段，由工程师研究有效的、具体的物理模型。

仿生学汲取了许多其它科学的方法，但作为一门独立的科学，它的方法有其独到之处。例如，仿生学的模拟法同生物学中一般的模拟法就不同。生物学的模型代替生物客体时，只提供有关生物客体的某种新的信息，而仿生学的模型则是要用人造系统来实现某种生物客体的某些方面的可能性。

仿生学研究的内容非常广泛，大致有五个方面：（1）信息仿生，它包括感官仿生，细胞内和细胞间通信、动物间通信仿生，以及智能仿生等方面。如模仿青蛙眼睛制成的电子蛙眼可以用来识别飞行的导弹。现在已投入使用的一种人造卫星自反差跟踪系统就是模仿蛙眼制成的。采用电子鸽眼改进的雷达系统，可设置在机场边缘或国境线上，它只对飞进来的飞机、导弹有反应，因而提高了发现目标的准确度。又如，模仿苍蝇嗅觉器官制成的高灵敏度小型气体分析仪，已用于分析宇宙飞船座舱内的气体成份。（2）控制仿生，包括体内稳态调控，肢体运动控制、动物的定向导航，生态系统的涨落等。如蜜蜂具有天然“太阳罗盘”，人们模仿它制成了导航设备偏光罗盘。又如，借助超声波回声定位，海豚在三公里以外便能发现鱼类，蝙蝠在飞行中能分辨直径0.1毫米的线，这些功能对提高雷达的灵敏度与抗干扰性能极有

参考价值。(3)力学仿生,它是关于动物飞行动力学研究。如按照海豚体形和身体各部比例建造的新型核潜艇,速度提高了25%。(4)化学仿生,它主要研究生物体内一些特殊的化学过程,以便使这些过程也能在工业中实现。如生物体中对于物质合成起关键作用的生物酶,比起化学工业中使用的催化剂效率要高得多,而且不需高压高温等条件。生物酶的模拟成功,必将给化学工业带来一场革命。(5)医学仿生,它主要是研究用人工仿制品代替人的有机体的某一部分,如人工心脏、人工肾、人造假肢等等、生物医学的图象识别及医学信号的分析和处理也是医学仿生的研究范围。

仿生学有着极为广阔的发展前景,各行各业,各个学科都可以从中得到启示,对生物控制论无疑也是起着很大的促进作用的。尽管仿生学目前还处于成长阶段,然而它的发展必将给现代生产和科学技术带来重大突破,成为科学技术革命中众多新学科里的一支生力军。

生物控制论与中医学控制论的方法

生物控制论中一个很重要的观点是整体性的观点,在这方面它与中医理论注意整体性观念,着重从功能上研究问题很有相似之处。因此,用生物控制论来研究中西医结合的问题大有裨益。

我国早在2000多年前已成书的《黄帝内经》,可以说是世界上最早的生物控制论著作。其中记载的经络学说实质上是世界上最早的古典生物控制论。我国古代的医学家们总结了大量的医疗实践经验。他们在当时“阴阳五行说”等原始唯物论与朴素辩证法思想的影响下,形成了对人体控制系统的总画面的认识。所谓经络,它是内属脏腑,外络肢节,联系内外,沟通表里,网络全身的气血运行的通路。它将人体的五脏六腑,四肢百骸,五官七窍联系起来,使全身上下左右,前后内外,相互协调,有机地组成一个有生命的整体。所谓气血,则与控制论中信息与载体的概念十分相

似。在方法上，经络学说是以整体观念为基本特点的，并着重论述系统的功能。如心经、肝经、脾经等术语，不是指解剖学中的某些组织与器官本身，而是关系到相应的器官的生理功能的系统。另外，在经络学说中也有“黑箱方法”，例如，中医的针灸就是向人体“黑箱”输入信息，中医诊断的望、闻、问、切就是观测黑箱的输出反应。

中医长期的医疗实践与临床现象表明，经络的功能是客观存在的，但是至今在解剖上还没有发现奇异的经络实体，这就引起了许多人对经络学说的科学性的怀疑。经络的实质究竟是什么呢？根据经络学说的论述，从生物控制论的观点看来，可以认为经络实质上是指人体整个生命活动的功能控制系统。因为它是一个功能控制系统，而不是个别的器官、组织，所以不能找到特异的实体结构。这个功能控制系统是一个以脑为控制中心的多级闭环控制系统，在经络学说中，称脑为“元神府”，它通过督脉（总督全身的阳经）、任脉（总任全身的阴经）等，控制五脏六腑，四肢百骸，而五官七窍，体表穴位则为测量装置（感受器）与外界环境发生联系。有人将“经络——人体控制系统”简化为下列方块图（见下页）^①。

总之，中医理论对控制论的许多思想、观点、方法都可以有所启发和丰富，反过来，生物控制论也可以使中医学的科学性得到精确的说明和鉴定，使中医理论真正建立在科学基础上，以进一步得到发展。生物控制论和中医理论的结合将为中医理论的发展开辟一条新的广阔途径。

① 涂序彦等：《生物控制论》，科学出版社1980年版，第242页。

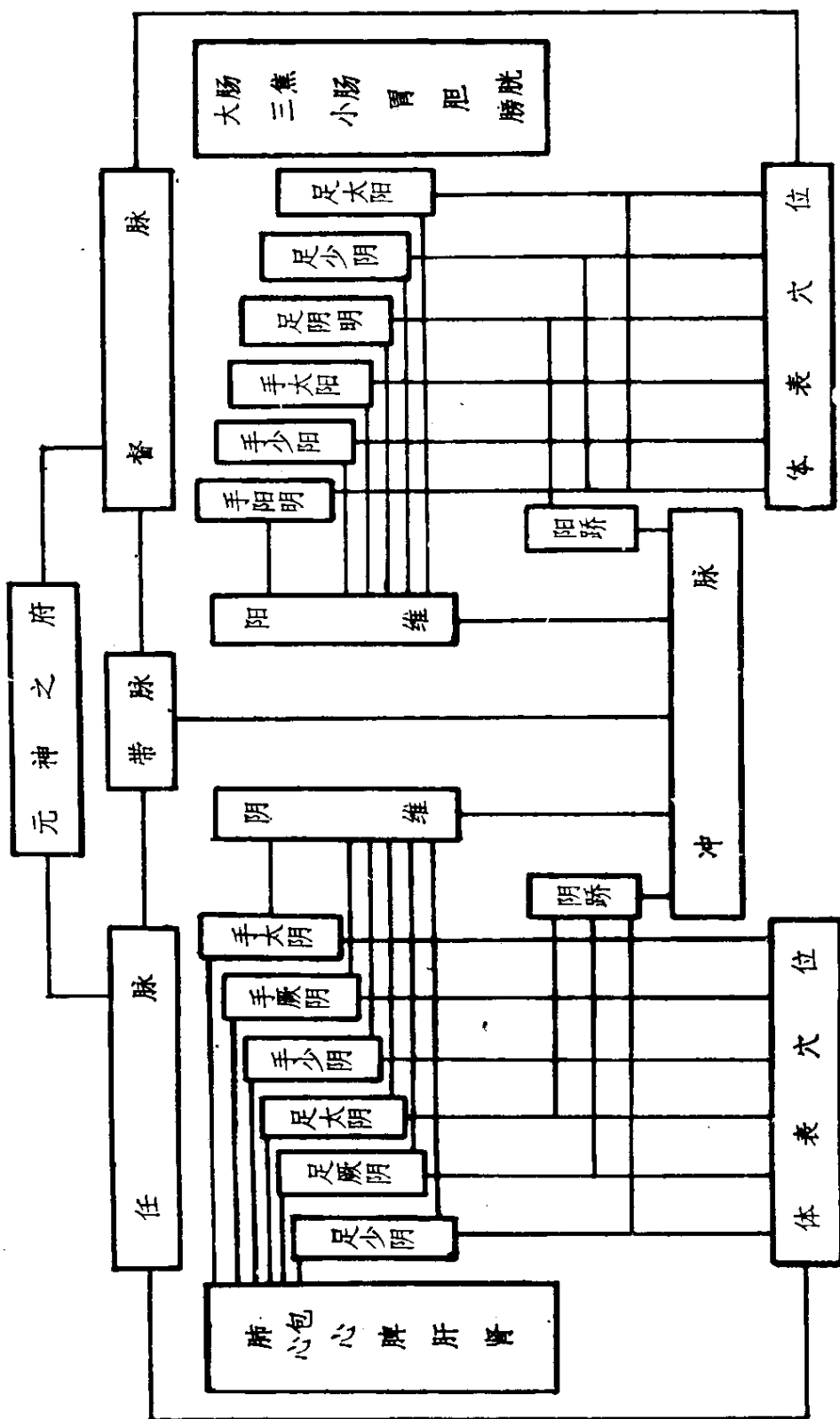


图4·30 经络——人体控制系统

第三节 社会、经济控制论

控制论从一开始就提出了控制论与社会这个重大问题。维纳在其《控制论》一书中，以比较慎重甚至保守的态度多次讨论过这个问题。他的另一部通俗性的著作《人有人的用处》，就是以“控制论与社会”作为副标题的。维纳把社会看做是一种信息、控制系统，因此，他认为控制论是有必要而且有可能运用于社会的研究与管理的。他甚至还对能在多大的程度上以及如何加以运用，和由此而可能导致怎样的后果，也提出过自己的见解。但总的来说，在50到60年代，关于控制论与社会的关系，特别是控制论应用于社会研究与管理的可能性问题，还是当时一个突出的争论问题。有关的一些分歧与论点，本书将在控制论的哲学问题中加以论述。这里，我们只是指出这样一个事实，就是经过30年左右的实践，现在一般都能认识到社会是一个信息、控制系统，控制论是能够而且必须运用于社会研究与管理的。当然对于有些问题还会有些不同观点，这是难免的。

这个历史情况使得社会控制论的形成是一个比工程控制论、生物控制论要晚的过程。在这个形成过程中，不能忽略系统工程与运筹学对于社会系统工程的研究所起的作用。

本书在这里所说的社会控制论是在广义上加以使用的，它是指控制论应用于社会领域的一种总称。就现在的情况来说，控制论已应用于社会学、国家管理、行政管理、法与法律、经济学、企业管理等各个不同的社会领域。例如，在现代社会学的研究中，引入了社会调节、社会控制、社会管理这样一些重要概念，涉及到政治、经济、伦理、道德、法与法律等多种因素对人的行为与社会效应的影响。在国家和法的研究中，把国家管理看作一

种特殊的控制论系统，是为实现一定的社会目地而进行最优化或次优化控制和信息处理的过程。在这个过程中，就法与法律来说，要肯定法律秩序、违法预防系统所起的调节与控制作用，尤其是在出现偏离和扰动的情況下如何使这一系统回到稳定的、优化的目的状态。所以，在维纳看来，“法律可以定义作对于通讯和通讯形式之一即语言的道德控制，当这个规范处在某种权威有力的控制之下，足以使其判决产生有效的社会制裁时，更可以这样地看。法律是以所谓正义得以伸张、争端得以避免或至少得以仲裁这样的方式来调节各个人行为之间的‘耦合’过程的。因此，法律的理论和实践包括两类问题，一是关于法律的一般目的即关于正义的概念等问题；一是使这些正义概念得以生效的技术问题”^①。这就是维纳控制论的法律观。他实际上认为，这些问题都是可能运用控制论的理论、方法与工具加以研究的。对经济系统的研究也是如此。所以，控制论在现在已经日益广泛地运用于社会领域，不仅进行定性的分析，而且尽可能予以定量的、优化的研究。它与系统工程、运筹学一道，已经成为研究与处理社会系统的一种有效的工具。

本书仅就其中发展得比较成熟，且对我们有重大实际意义的经济控制论加以简略的概述。

一、经济控制论的形成

目前，国外对于经济控制论的解释与了解是很不一致的，有的把它看作是在经济管理中应用数学方法和计算技术的总称；有的把它看作经济数学方法（即在经济研究和计划中运用数学方法）的一个特殊的部分；还有的把它看作是一门独立的边缘科

^① 维纳：《人有人的用处》，商务印书馆1978年版，第83页。

学，等等^①。值得注意的是，这些不同的意见至少有一个基本的一致点，即把经济控制论看作是控制论的基本概念、基本理论（包括适用于一切系统的控制与信息共同规律）与方法运用于经济领域（包括经济活动、经济管理）而形成的一门边缘学科。

从这样一个公认的观点出发，就要看到经济控制论的两个突出特点：

第一，把控制论的基本理论与方法运用于社会经济领域，就是要把一个社会经济系统（小如一个企业，大至一个部门、一个国家、整个世界）看作是一个具有反馈调节，特别是信息反馈的控制论系统。

第二，要对社会经济系统进行定量的描述与处理，以求达到最优控制，作出经济决策。

必须指出，早在经济控制论出现之前，在经济学的研究中就出现过这类思想与方法的萌芽。

人类社会一旦出现，随着生产方式的发展，人们的社会经济活动日益复杂，社会经济活动中各种因素的相互联系也日益密切。特别是资本主义商品生产的发展，使得价值规律对资本主义经济的发展起着重要的调节器作用。这一现象早就被经济学家们注意到了，例如，英国古典政治经济学家亚当·斯密曾经指出：自由市场的竞争是“受着一只看不见的手的指导，去尽力达到一个并非他本意想要达到的目的”^②。可以说，从古典政治经济学到现代资产阶级政治经济学，都在一定程度上认识到社会经济过程存在着自动调节与控制。不过，他们大多把这看成是自发地起作用的。

① 参看乌家培：《谈经济控制论》，载《世界经济》1979年第9期，第71页。

② 亚当·斯密：《国民财富的性质和原因的研究》下册，商务印书馆1974年版，第27页。

对于社会经济系统进行定量的研究，也不是从经济控制论才开始的。早在1676年英国古典政治经济学家威廉·配第(William Petty)在《政治算术》一书中，就企图用“数字、重量和尺度”来阐明经济现象。在这本书的序言中，配第提出了他研究经济现象的方法和态度：“和只使用比较级或最高级的词汇以及单纯作思维的论证相反，我却采用了这样的方法（作为我很久以来就想建立的政治算术的一个范例），即用数字、重量和尺度的词汇来表达我自己想说的的问题，只进行能诉诸人们的感官的论证和考察在性质上有可见的根据的原因。”^①他在经济研究中忠实地坚持了这个原则，配第被公认为是最早地认识到，只进行质的分析而不建立在计量的基础上，那么经济现象的研究就无法取得进展的经济学家之一。对于配第在经济研究方面的贡献，马克思给予了高度的评价，并认为配第创立的“政治算术”是“政治经济学作为一门独立科学分离出来的最初形式”^②。称赞他为：“政治经济学之父，在某种程度上也可以说是统计学的创始人”^③。

1711年意大利工程师季奥万尼·切瓦(Giovanni Ceva)曾经积极主张在经济理论的研究中采用数学方法。这些思想对以后经济计量学的产生在方法论上有过较大的影响。1838年法国经济学家古诺(A.A.Gournot)在《财富理论的数学原理》一书中，把商品需求用数学的函数关系表示出来，但他没能列出有关的方程式和数据。在资产阶级经济学家看来，直到19世纪后半期经济学中才大量运用数学方法。

1871年，英国资产阶级经济学家杰文斯(W.S.Jevons)在《政治经济学理论》一书的序言中指出：“我早以为，经济学即

① 威廉·配第：《政治算术》，商务印书馆1978年版，第8页。

② 马克思：《政治经济学批判》，人民出版社1976年版，第37—38页。

③ 马克思：《资本论》第1卷，人民出版社1972年版，第302页。

为研究量的科学，自亦须在事实上——即令不在名词上——成为数学的科学。”^①也在这个时期，当时瑞士洛桑大学教授瓦尔拉（Leon Walras）创立了“全部均衡经济学”，用数学公式把商品的供给和需求，把生产、货币以及商品的价格，完全用联立方程式表示出来。因为他认为，经济现象是相互依存，相互制约的，整个经济现象都要象解联立方程那样，把各个经济变量结合在一起，才能确定经济变动的原因和结果。这样，才为以后的经济计量学奠定了方法论基础。

众所周知，运用数学方法研究经济过程是马克思多年的夙愿，马克思在1873年5月31日致恩格斯的信中指出：“你知道那些统计表，在表上，价格、贴现率等等在一年内的变动是以上升和下降的曲线来表示的。为了分析危机，我不止一次地想计算出这些作为不规则曲线的升和降，并想用数学方式从中得出危机的主要规律（而且现在我还认为如有足够的经过检验的材料，这是可能的）”^②。为了研究资本主义的经济，马克思曾经运用数学方法构造过几个经济模型。遗憾的是他没有来得及深入展开这方面的研究，在他以后很长的一个时期，马克思主义政治经济学对于数量化的研究问题，也没能给予足够的重视。

1926年挪威经济学家弗瑞希（R. Frisch）首先提出并使用了经济计量学这个术语。值得注意的是，他是仿照生物计量学（biometrics）提出这个概念的，这在方法论上是有重要意义的。既指出了经济学是要研究量的，又看到生物学中已有计量的研究，那么对之加以推广，在经济学中运用数学方法，这是很自然

① 威廉·斯坦利·杰文斯：《政治经济学理论》，中华书局1941年版，第2页。

② 《马克思恩格斯〈资本论〉书信集》，人民出版社1976年版，第329—330页。

的。可见，这些思想为经济学的计量研究提供了方法论的基础。同时，弗瑞希把经济计量学界说为“统计学、经济理论和数学的结合”。直到如今，经济计量学并没有超过这个范围。值得注意的是：第一，他正确地指出了经济理论的作用。无论是数学还是统计学（在一定意义上也是数学的一个分支），不过都是工具，利用数学工具去建立经济模型，没有经济理论的指导是不可能的。第二，他的上述界说使经济计量学与数理经济学、经济统计学区别开来。如上所述，就资产阶级的政治经济学来说，从一些古典的政治经济学家开始，就已经注意到了经济学的定量研究，但是，真正作了一些这类工作的，还是庸俗政治经济学家。最初是其中的数理经济学派，他们已经作到了把庸俗政治经济学的某些理论加以公式化，列出函数关系甚至方程式。但是，他们不考虑影响经济关系的随机因素，也不注重从实际经济活动中运用统计数据，提出系数的估计值，使这些公式具体化、数据化，以便具有实际意义。而另一方面，经济统计学虽然注意从实际经济活动中提炼出统计数据，却不注意理论的说明与推导。因而都是有片面性的。经济计量学则把这两方面结合起来，各避其短而取其长，在方法论上就比较完备了。例如，经济计量学能为经济理论中的弹性特点和其它参数提供比较精确的估计值，因而能起到一定的实际作用。正因为如此，资产阶级经济计量学家们认为，这样把理论与实际相结合，才使经济学成为真正的科学、精确的科学。可以说，在资产阶级庸俗政治经济学中，经济计量学比数理经济学派前进了一大步。

根据上述的情况，真正作为经济计量学的奠基性著作是美国哥伦比亚大学教授亨利·勒德威尔·穆尔(Henry Ludwell Moore)，在1929年写成的《综合经济学》一书，这本书对资本主义国家的经济周期，工资率变化和社会商品的需求等等，给出了计量的数学公式。到1930年，在美国成立了国际性的经济计量学会，1933年，

出版了《经济计量学》杂志。由此可以认为，经济计量学作为一门独立的边缘科学，是在20世纪30年代产生的。开始时，它与资产阶级庸俗政治经济学密切相关，但后来，由于它要用数学的工具，也与其它的经济理论和学派相结合，而显示其独立的性质。

通过以上简要的历史回顾，可以看出：经济控制论的基本理论与方法，早在古典政治经济学、资产阶级庸俗政治经济学，马克思主义政治经济学，尤其在经济计量学中已有某些萌芽。因此，经济控制论是沿着两条相互渗透的途径而形成的。一条途径是，一些控制论学者将控制论的基本概念、理论与数学方法，自觉地运用于经济活动中的自动调节、控制与信息的研究；另一条途径是，一些经济计量学家吸收控制论的基本理论，并运用控制理论的数学工具而扩展其研究的领域。

就第一条途径来说，更加与经济控制论有着密切的渊源关系的，可以追溯到200多年前法国重农学派的经济学家魁奈（F. Quesney），他是一位宫廷御医。他曾用类比方法，用人体血液循环过程来比拟、分析经济因素的内在联系。他在1758年编成的《经济表》中，清楚地说明了一个国家（实际上是当时的法国），每年社会总产品的生产、流通和分配情况。魁奈的《经济表》，可以说是世界上第一个宏观经济模型，马克思曾给予高度的评价。

特别应当指出，马克思主义创始人在《资本论》和其他一些著作中，深刻地揭示了社会经济过程中的自动调节与反馈的联系。《资本论》中关于生产资料和生活资料两大部类之间相互关系的分析，就是很典型的例子。马克思和恩格斯比资产阶级的经济学家们更广泛而深刻地认识到，社会经济过程中存在着自动调节与反馈的关系，从而更好地、更科学地解释了社会和经济的发展过程，并且进一步指出了对这类自发的调节关系必须进行自觉控制。他们关于推翻资本主义制度，建立以社会主义公有制为基础的社会主义制度，实行计划经济，由必然王国进入自由王国的

学说，充分说明了这一点。控制论所强调的自觉控制与马克思主义关于不仅要认识世界而且要改造世界的思想实质上是一致的。马克思和恩格斯是属于最早认识到要对社会经济过程进行自觉控制的卓越人物之列的。

同时也要看到，某些资产阶级经济学家曾在一定程度上认识到自觉控制的重要性。大家知道，资产阶级庸俗政治经济学认为，既然在资本主义经济中存在着调节关系，那么，依靠资本主义市场经济的这种自发调节作用，就能保证资本主义经济的顺利进行和发展。这显然是错误的。英国现代资产阶级经济学家凯恩斯带头放弃了这种理论，在本世纪30年代，凯恩斯针对当时资本主义世界的周期性危机，主张由资产阶级政府来干预经济管理，并且利用某些经济因素对资本主义经济进行自觉的调节。这些理论与建议，曾为当时的美国总统罗斯福所接受，成为罗斯福新政的一个重要组成部分，企图用来缓解当时的经济危机。

上述种种情况，可以看作是与经济控制论的产生直接相关的渊源，或者称为相关的思想萌芽，但是，历史的发展表明，经济控制论的产生只能是在具有一般理论和数学性质的控制论产生之后。

大家知道，维纳在考虑把控制论推广应用于社会领域时，已经意识到控制论对于国民经济的计划与管理是一种重要的工具。从50年代初期开始，英美等资本主义国家首先开始将控制论方法应用于制订企业的经济计划、管理工作和其它一些社会经济现象的研究。例如，在1951—1953年期间，美国加利福尼亚大学的史密斯（O.T.Smith）教授就运用电子模拟装置来模拟资本主义经济体系，分析研究了其稳定性和对各种干扰的反应，并且对产生的原因作了分析。史密斯的这一工作，可以说是对上引1873年5月31日马克思致恩格斯的信中所表示的愿望，作了实验性的说明。史密斯认为，用电子模拟装置解决具体的和一般的经济问题

是具有相当大的可能性的。

有必要指出，史密斯的这种具有经济控制论性质的研究工作，是与经济计量学的研究相关联的。1933年，M.卡列斯基在其《试论商业循环理论》（华沙出版）一书中，提出了关于资本主义商业循环的一种模型，给出的是一个差分—微分方程，作为这个系统的反应方程。对于这个模型及其求解的问题，《经济计量学》杂志与数理经济学著作中有过讨论。史密斯与爱尔德莱（J.M.Erdley）1951年在《电工》杂志上发表了《用于一个经济系统的电子模型》一文，为求解卡列斯基模型的方程设计了相应的模拟计算机系统。这一事例表明，在经济控制论出现之前，经济计量学、数理经济学在给出经济模型方面已经作过一些工作，而经济控制论及计算机技术的应用，则能进一步解决一些原来难以解决的新问题，从而使经济学的计量研究前进了一大步。

1953年，英国电子工程学教授图斯丁（A.Tustin）发表了《经济系统的机制》一书，第一个将电子网络理论运用于经济的调节与控制问题。他用控制论的方框图、信号流图对凯恩斯关于投资、消费、收入之间关系的理论进行了描述。

1957年，德国慕尼黑出版了《经济调节过程与技术调节过程比较》论文集，其中也收集了大量关于经济控制论的论文。

如果我们将上述事实看作是控制论、信息论与计算机技术向经济领域扩展的话，那么在同一时期，也有着经济计量学、数理经济学汲取控制论、信息论与计算机技术这些新的科技成果的情况。这就是上述的第二条途径。仿佛是两个陌生的同行，开始时彼此并不知道对方所作的工作，到后来才越来越了解，相互交流成果，取长补短了。

50年代中期，经济学家菲利普斯（A.Phillips）和艾伦（R.G.D.Allen）都分别对经济控制论的建立做出过贡献。艾伦在其专著《数理经济学》一书中，运用图斯丁所提出的方法，以方框图

描述过几种模型，如菲利普（Phillips）模型、希克斯（Hicks）模型、卡列斯基（Kaiecki）模型及戈德文（Goodwin）模型，这些都属于闭环的经济控制论系统。艾伦还系统地阐述了经济控制论的一些基本概念，把传递函数、反馈、开环控制、闭环控制、振荡及稳定性等理论和方法引入经济分析。这部著作的第九章是以“经济调节：闭环控制系统”为标题的，着重讨论了经济反馈系统和传递函数在经济领域中应用的问题，实质上讲的是经济控制论的内容。

到了50年代末60年代初，已经有不少经济计量学家和数理经济学家在自己的文献中，运用了控制理论中的一些理论和方法，如最优控制的三种主要方法——线性规划、动态规划、庞特里雅金最大值原理等。应该注意的是，这些理论与方法已经属于现代控制理论的范围，而且也属于系统工程、运筹学的内容。可以看出，随着控制论的研究与进展，一些新的理论与方法，如现代控制理论，大系统理论等等也被陆续地引用到经济学的研究中来。

例如，1957年波兰的兰格（O. Lange）在其专著《经济计量学导论》中，已经把线性规划、最优规划这类属于运筹学与系统工程的数学理论运用于经济分析。到了1965年，兰格在其专著《经济控制论导论》一书中，又比较系统地阐述了控制论的基本概念、理论及其在经济领域的应用。这本书的特点是，既引用了经济计量学与数理经济学的优秀成果，又分析与研究了控制论应用于马克思主义政治经济学的问题，而且注意了吸收控制论、系统工程的最新成果，如可靠性理论等等。关于可靠性问题，是早在50年代，由冯·诺意曼发表的《概率逻辑以及由不可靠元件综合成可靠的装置的问题》^①这一著名论文所提出来的，但真正引

^① 载C.E.申南、J.麦克卡赛编：《自动机研究》，科学出版社1963年版，第57—123页。

起对这个问题的广泛注意则是由于对复杂系统、大系统的研究，系统可靠性已经成为系统工程和大系统理论中的一个重要的组成部分。兰格不仅指出冯·诺依曼的这一理论可以应用于经济领域，而且用可靠性原理研究了经济系统的效率问题。

一般认为，控制论专家B·诺狄克是较早运用现代控制理论于经济研究的。他在1971年发表的论文中，给出了一个包括28个状态变量，3个控制变量（即超额税、政府支出、货币供应量）的美国经济模型。这显然是用的现代控制理论。

由此，系统工程中的系统分析、运筹学、控制论中的现代控制理论、大系统理论等等，日益广泛地渗透到经济控制论的研究中去，使之吸收了新的营养，成为一种更为有效的研究工具。国内外学术界一般认为，本世纪60年代以来逐步形成了经济控制论。同时，也直到这个时期，经济控制论才日益广泛地受到重视和应用。

通过以上对经济控制论形成过程的历史性的叙述，我们看到：

第一，并非直到经济控制论出现之时人们才认识到社会经济活动中存在着调节与控制的关系，也并不是只有从经济控制论才开始对社会经济进行定量的研究。实际上，这种观点与方法在控制论出现以前就曾被研究和运用过。因此，关于经济控制论的形成，不能仅仅看作是控制论的推广，它也是经济理论与数量化方法发展的必然趋势。事实上，在经济控制论的形成过程中，它是与经济理论、数量化方法发生过相互渗透的。因此，经济控制论的形成应该看作是：一方面是控制论推广应用于经济领域，另一方面又是经济学发展的必然趋势与产物。

第二，经济控制论绝不是简单地搬用了以往经济学中关于调节与控制思想和数量化的方法，两者是有质的区别的。首先，经济控制论较之以前的一切经济理论，使用了系统的控制论概念、理论和方法，去分析、研究经济活动，把它们看成是一种

控制论的经济系统，强调了这类系统的整体性和信息反馈的特点，这是前所未有的。其次，经济控制论不仅是定性地把经济活动看成为一种控制论系统，而且用工程控制论的数学工具与方法对其进行定量的研究，将这两方面有机地结合起来，这也是前所未有的。因此，可以说经济控制论是在质上具有崭新的特点的科学。

第三，还需看到，经济控制论的形成还是与系统工程、运筹学相互渗透的结果。前已指出，工程控制论的进展经历了经典控制理论、现代控制理论和大系统理论的三个阶段。其中，后二者与系统工程、运筹学相互渗透，在60至70年代，出现了经济系统工程的研究。而经济系统工程与经济控制论系统是密切相关的，在经济信息系统的分析中都要涉及这些问题。就历史的事实来说，在控制论向经济领域推广的早期就与经济计量学、数理经济学发生了相互渗透。从60年代开始，由于现代控制理论与大系统理论的出现，则日益与系统工程、运筹学相互渗透。这是因为，社会经济系统是一种大而复杂的系统，要对它进行定性和定量的系统分析与研究，只有在60至70年代，现代控制理论、大系统理论和系统工程、运筹学推广应用于社会经济领域以后才有可能。在早期，尽管有了经典控制理论，在40年代已经有了系统工程和运筹学，但由于方法和工具的薄弱，只能进行一些简单的、初步尝试性的研究。这是很不成熟的，成效也不够大。

关于经济控制论的形成，可以用下图（见下页）来表示：

二、控制论应用于经济研究的可能性

要把控制论应用于经济系统，首先要解决的是控制论应用于经济研究的可能性问题，这就要认识到经济过程也是一种控制与信息的过程，是可以应用控制论方法研究的。对于这个问题，曾经展开过热烈的讨论，在下一章关于哲学问题中将加以概述。在

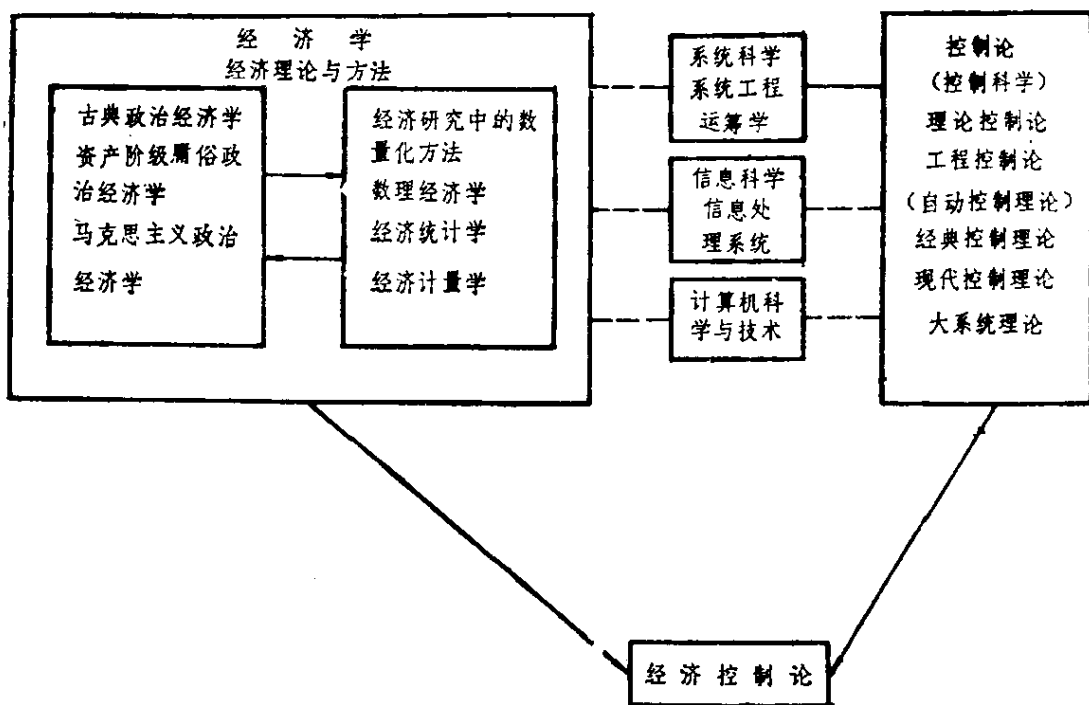


图4.31 经济控制论形成示意图

此，我们只用实际的事例来分析和论证这一点。

如前所述，马克思在分析和研究社会经济关系时运用过控制论的基本思想。在《资本论》第二卷中，马克思对扩大再生产中两大部类生产的分析，是一个很好的例证。罗马尼亚前总理、经济控制论专家曼内斯库（M. Mănescu）用下图（见下页）形象地描绘了这种内在的联系（包括反馈作用）^①：

兰格在其专著中也对此做过细致的分析。他指出，马克思在《资本论》中关于再生产的理论，是很好地运用了系统与控制的思想的。马克思把资本主义的再生产看作是一个系统，其中包括两个子系统，即第一部类（关于生产资料）的生产和第二部类（关于消费资料）的生产。马克思运用系统分析的方法，找出了进行再生产在这两部类之间的关系与条件，并用价值的形式来表

^① M.曼内斯库：《经济控制论》（节译），载《经济研究参考资料》1982年第147期，第57—58页。

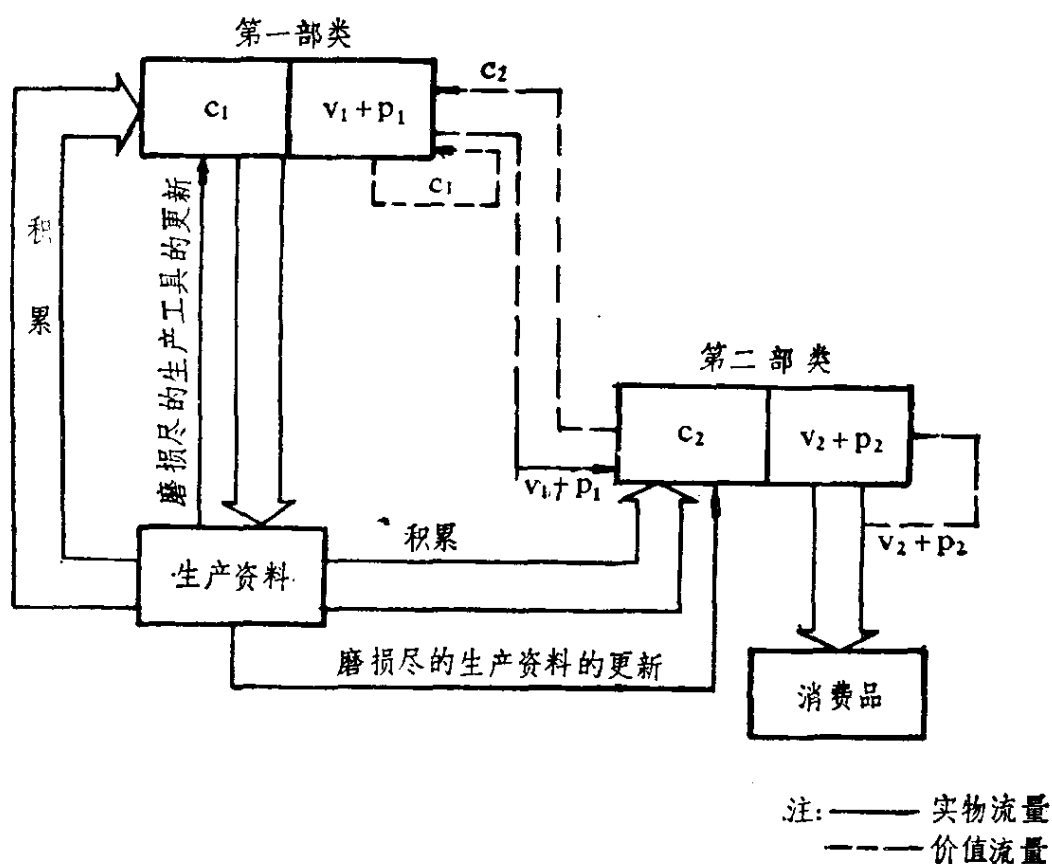


图4.32 马克思的生产图式

示，以 C 、 V 、 m 及 X 分别表示不变资本、可变资本、剩余价值和产品，用角码1和2表示第一与第二部类，则马克思的经典理论可以用下式来表示：

$$C_1 + V_1 + m_1 = X_1$$

$$C_2 + V_2 + m_2 = X_2$$

简单再生产的平衡条件： $C_2 = V_1 + m_1$

扩大再生产的平衡条件： $C_2 < V_1 + m_1$

兰格对此作了控制论的解释，他引进生产资料消耗系数 a_c 与直接劳动消耗系数 a_{v+m} ，分别定义如下：

$$a_c = \frac{c}{X} \quad a_{v+m} = \frac{v+m}{X} \quad (\text{其中 } a_c + a_{v+m} = 1)$$

这样，则可将国民经济各部类总产品表示为：

$$X_1 = C_1 + (V_1 + m_1) = a_{1c} X_1 + (V_1 + m_1)$$

$$X_2 = C_2 + (V_2 + m_2) = C_2 + a_{2(v+m)} X_2$$

根据简单再生产的平衡条件 $C_2 = V_1 + m_1$ 则

$$X_1 = \frac{1}{1 - a_{1c}} (V_1 + m_1)$$

$$X_2 = \frac{1}{1 - a_{2(v+m)}} C_2$$

其相应的框图分别为：

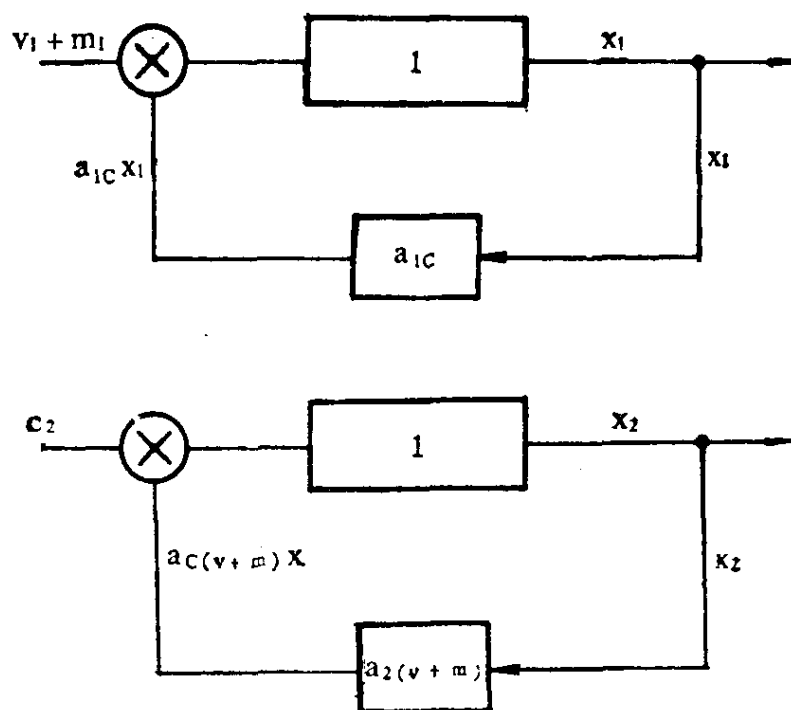


图4.33 马克思关于两大部类再生产关系的示意框图

其中， $\frac{1}{1 - a_1}$ 与 $\frac{1}{1 - a_{2(v+m)}}$ 分别为相当于传递函数的变换

算子。

兰格进一步还讨论了扩大再生产问题，并且引入时间因素，讨论了动态的模型。这表明，兰格是运用了经典的静态与动态的线性系统就其投入与产出的结构，从控制论的角度来解释了马克

思的再生产理论的。这是用具有反馈的控制论系统来加以解释的^①。由此也可以看到，马克思在《资本论》中提出的再生产理论是运用了控制论与系统分析的思想的。曼内斯库在其专著《经济控制论》的第七章中也进行了分析，并得出了类似的结论。当然，我们不能据此就说马克思是第一个控制论学者，因为控制论或经济控制论作为一种系统的理论与方法，当时还没有形成。

三、经济控制论系统的概念

在把控制论应用于经济系统时，必须认真分析与考虑经济系统本身的特点，将这个系统看作是一种经济控制论系统，这就是经济控制论的研究对象。它可以是一种微观经济的控制论系统，也可以是一种宏观经济的控制论系统。经济控制论系统与一般的经济系统应该有所区别，后者包含的内容较为广泛；前者则只是后者的一种子系统，是指用控制论方法去分析的经济系统。另一方面，经济控制论系统与一般的控制论系统也不同，前者只是后者的一类特殊的经济控制论系统。这种特殊性主要表现为以下几个特点：

第一，经济控制论系统是一个包括人的因素的系统，正如曼内斯库在其《经济控制论》第一章中所指出的：经济控制论系统与其它系统不同的一个本质特点，就在于它是一种由人们自觉地直接参与的系统，人在这个系统中是作为决策因素与执行因素的，这个因素既可以起到促进系统最优运转的作用，也可能起到干扰甚至破坏的作用。这一特点使得它与系统工程往往相互渗透，因为它们一般都要考虑人的因素。

^① 参看奥斯卡·兰格：《经济控制论导论》，中国社会科学出版社1981年版，第49—51页。

第二，由于存在着第一个特点，再加上经济控制论系统一般是巨大的复杂系统，因而在这里不确定性起着重要的作用。这个特点早在经济计量学中就有一定的反映。以外生变量为例，外生变量是指其数值不是由方程体系内决定的，而是由外部决定的变量，如政策、人口、外国行动、气候等等非经济的因素，在经济计量学中要求这类因素是一类已知的数值，但要做到这点无疑是相当困难的。其中一部分，如政策、法令、人口之类是比较不稳定的，而如外国行动、气候等等则更不稳定。要使这些数值成为已知，往往要加以估值，所以在经济计量学中估计参考数值是很重要的。再如，在经济关系中往往具有弹性的特点，例如，当国民收入增加时，某些商品的需求量会相应增加；但当收入减少时，其需求量也还可能有一定的增加。因此可以说经济关系最主要的特征之一是包含着不确定性。随机性、模糊性、偶然性等等不确定因素是经济控制论难以处理的一个重要特点，它使得对这类系统的能控性与能观测性问题的研究更加困难。

第三，经济控制论系统的大而复杂的特点，使得经济控制论系统具有长效性。这就是说，作用于这类系统的某些因素（例如人口、折旧费用等等），可以长期而较稳定地起作用，它们的经济效益往往作为一种整体效益，要经过一段时间才能表现出来（例如，经济计划的实现）。这就使经济预测和在经济过程中的调节与控制，既有可能又很必要。

第四，任何一个系统都是物质与（或）能量与（或）信息的系统。作为一种经济系统，由于物质、能量、信息在社会中转化为一定的价值形态，因此它可以以产品、商品、货币等形式表现出来，在物质、能量、信息与价值形式之间存在着一定的变换关系。一个经济系统，既可以直接以物质、能量、信息的形式表现出来，又可以从其特定的价值形式表现出来。在一个经济控制论系统或经济系统工程所研究的大经济系统中，对于目标函数的选

择就要考虑这个特点。例如，在通货膨胀的情况下，要控制物价指数，以保证生活水平的稳定，就工资收入者来说，就要考虑货币工资与实物工资（或实际生活水平）的区别。这也表明，不仅要考虑经济费用，而且必须考虑经济效益，必须对二者进行科学的对比分析，才能真正达到最优控制或次优化的控制。在资本主义国家的经济学中，已经出现了费用—效益分析（cost-Benefit Analysis），从一个侧面说明了这个问题的重要性。因此，在经济控制论系统中，在最优控制中，要注意到费用与经济效益的问题，这比一般的最优控制问题又更为复杂一些。

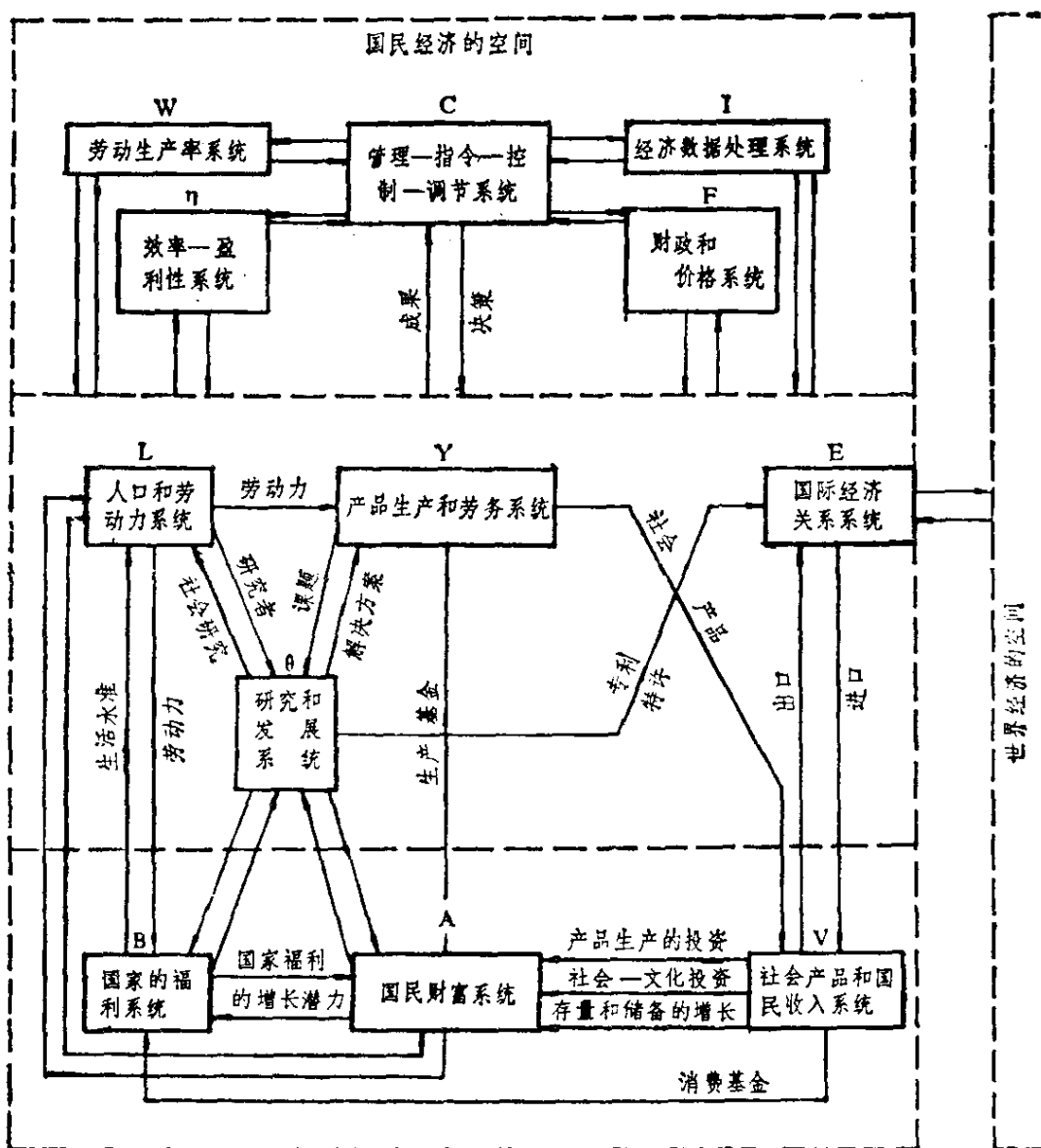
经济控制论系统至少具有的上述特点，决定了这一学科研究的一系列特点，这在经济控制论的基本内容中可以明显地表现出来。在经济控制论中，经济控制论系统具体化为企业的、部门的、国家的、世界的系统。曼内斯库提出了“经济控制论系统”的概念，以他为首的罗马尼亚学派制订出了一整套国民经济控制论系统的综合框图（见下页）^①。

在这个总控制系统中，曼内斯库相应地提出了“经济空间”与“经济时间”等概念，把国内的整个国民经济综合体作为一个独立的特大系统，即“国民经济空间”来对待，通过对外贸易及其它经济交流与“世界经济空间”（相当于前一系统的环境）相联结。在“国民经济空间”中以国民收入系统作为核心，围绕国民收入的生产和分配，将有关的系统联结起来。这些系统按其功能可以分为三大类：一类是起调节作用的系统，称为综合系统，主要是管理系统；一类是起执行作用的系统，称为经济执行系统；还有一类是反映经济活动成果的系统，称为最终积累系统，其中主要是社会总产值和国民收入系统。显然，这是一个多层次的复杂的大系统，这些系统、子系统之间的联系，就是劳力、物

^① M.曼内斯库：《经济控制论》（节译），载《经济研究参考资料》1982年第147期。

质、动力、财务、信息等等的流动,它们都是具有方向性的矢量。它们正是物质与(或)能量与(或)信息的具体表现形式,其中有的是以价值形式表现出来的。人的因素不仅主要反映在综合系统中,而且在劳力中也有反映,也作为生产力的一种因素而反映出来。

曼内斯库还进一步指出,国民经济空间的控制论概念是由投



综合系统: C.W.I.F. η .

执行系统: L. θ .Y.E.

最终积累系统: V.A.B.

图4·34 国民经济的总控制系统框图

入空间、状态空间和产出空间所形成的总体来规定的^①。我们用 ϕ 表示投入空间， x 表示状态空间， ψ 表示产出空间。这样，国民经济空间即可以用三个空间的组合来表示，如图：

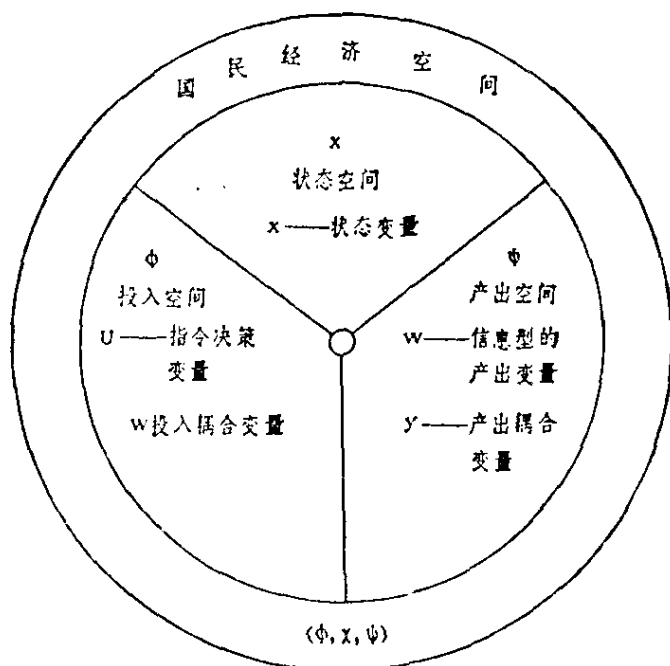


图4.35 国民经济空间的控制论概貌

四、数学模型的建立

在我们对于经济控制论系统进行了分析之后，进而就要考虑如何建立其数学模型的问题，这是经济控制论研究的核心问题。目前，模型方法已经广泛地应用于自然科学的各个分支，并且渗入到社会科学的研究之中。经济控制论系统数学模型的建立，汲取了一般建立模型方法之所长，根据社会经济系统的特点，有如下的几个步骤：

第一，建立经济控制论系统模型的第一步，就是要根据一定

^① M.曼内斯库：《经济控制论》（节译），载《经济研究参考资料》1982年第147期。

的经济理论，确立相应的经济控制论系统，进行系统分析，确定有关因素的内在联系，以建立相应的框图。

在经济控制论系统的建立和所进行的系统分析中，是不能离开经济理论的指导的，这可以举例来说明：大家知道在凯恩斯的基本理论中，有一条重要的原理，即“凯恩斯原理”，认为，从纯支出总额这个意义上来说，国民经济中的国民收入（即去掉生产资料折旧后）是由两部分组成的，一部分是用于投资的部分，以A表示；另一部分是用于消费的部分，以C表示，假定消费部分C是国民收入的线性函数，即 $C = cy$ ，其中c为消费系数， $0 < c < 1$ ，因国民收入不会全部用于消费，则有：

$$Y = A + C = A + cy$$

$$\text{于是} \quad Y = \frac{A}{1 - c} = \frac{1}{1 - c} A$$

这里 $\frac{1}{1 - c}$ 称为凯恩斯乘数。

以A为这一经济控制论系统的输入，Y为输出，则 $\frac{1}{1 - c}$ 就是一种变换算子，它是与传递函数相当的，在结构上具有相似性。正因为如此，兰格认为，凯恩斯乘数可以看作是反馈乘数的特例^①。

很显然，上一数学模型的得出，是以凯恩斯的经济理论所进行的系统分析为指导的。然而，马克思主义政治经济学关于国民收入与消费关系的理论与之是有区别的，在资本主义社会和社会主义社会又是不同的，它们虽然都属于反馈的关系，但所得到的数学模型是不会相同的。当然，在模型作出以后，还要有仿真的问题、加以检验的问题。

① 参看奥斯卡·兰格：《经济控制论导论》，中国社会科学出版社1981年版，第27页。

由上可见，对于任意一个经济控制论系统的研究，作为第一步，就是要自觉或不自觉根据地根据一定的经济理论进行系统分析，给出相应的框图。就这一步来说，可以说是一种定性的分析，以便弄清楚其各种因素之间的内在联系。以便进一步进行定量的处理。

第二，将工程控制论的数学方法，结合经济领域的具体情况（如分析内生变量与外生变量），运用于经济控制论系统，建立其数学模型。

所谓建立经济控制论系统模型，主要是指数学模型。现在，对经济活动进行定量研究的除了经济控制论以外，还有经济计量学、经济系统工程和运筹学（包括有关的管理科学）。它们都要建立数学模型，它们之间相互联系又相互渗透。

以现代经济计量学为例，它主要涉及三个方面，即市场需求分析、经济活动分析和投入产出分析。这些分析，都要先分析出那些是外生变量（主要指非经济因素，其数值不由方程本身决定，但应该是一种已知值），那些是内生变量（指经济因素，又称“经济变量”，由方程所决定，是未知值），从而建立数学的经济模型，也就是建立相应的定义性方程或随机方程或结构方程，这是第一步。作为第二步，就是要根据有关的数据估算参数值。第三步，要对从理论上提出的上述模型加以实际的验证。然后，作为第四步，就是对方程求解（一般是用计算机系统来完成的），对各种方案进行比较选择，找出最优或可满意的方案，以便作出决策，制定规划和政策，并对未来加以预测^①。

显然，上述经济计量学研究的方面、步骤等等与经济控制论、系统工程是很一致的。但是，还要看到它们之间又是有所区

^① 参看胡代光：《资本主义国家经济计量学评介》，载《经济研究参考资料》1980年第21期。

别的，主要是研究的角度和侧重的方面不同。就“系统”来说，它们研究的都是经济系统。然而，经济控制论是从控制与信息的角度来研究的，称为经济控制论系统；系统工程是从整体性角度，着重研究管理系统的，称为经济系统工程；经济计量学则不限于上述的角度，可以更为广泛一些。就它们所使用的方法和数学工具来说，也是既相联系又有所区别的。经济控制论主要是运用工程控制论的数学方法，特别是现代控制理论与大系统理论；经济系统工程主要是运用运筹学等；而经济计量学原来与统计学密切相关，运用经典数学方法较多，虽然现在也不断地引入了新的数学工具，但在有些方面仍然不如经济控制论和经济系统工程的方法有效。因此，尽管出现了这三门学科相互渗透的情况，而经济控制论仍然保留着自己的特点，这就是：它是从控制与信息的角度，运用工程控制论的数学方法，来建立经济控制论系统的数学模型的。

第三，经济控制论建立其数学模型的目的是要解决最优控制的问题，这一般是通过电子计算机进行仿真，对各种方案进行比较选择后，来解决决策问题的。可以说，经济控制论的基本任务就是解决最优控制与决策问题。但是，由于经济控制论系统是一种有人的因素参与的系统，所以最优控制的问题比较复杂，不仅较难求得，而且有时即使在数据上是最优的，而实际并不完全合适。因此，一般只求达到次优化。

第四，运用自动控制理论、系统工程、运筹学等方法和工具，从整体上研究上述经济控制论系统的各种特性，在解决能控性、能观察性的前提下，研究其稳定性问题，以便设计相应的施控系统，通过信息反馈对其受控系统及时的、有效的自动调节和控制，力求通过最优的途径保证上述指标或目标的实现，这就是经济管理问题。给出最优的经济决策，通过最优的经济管理，以实现所给出的经济指标，就是最优的经济控制。这是经济控制论

的主要任务。

应该指出，经济控制论不仅要求达到最优控制的目的，而且要求在整个的经济过程中能进行有效的自动调节与控制，以保持系统的稳定性，通过最佳途径达到最优控制的目标。在这方面，它比经济计量学是有所发展的。比如，经济预测早已成为经济计量学的重要内容之一，与之相比，经济控制论则不仅能更有效地进行经济预测，而且能有效地进行自觉的调节与控制，以实现最优控制。在一定的意义上可以认为，只有既能对最优目标进行预测，又能通过自觉的自动调节与控制，通过最佳途径来实现预测，才算全面地实现了最优控制。经济控制论之所以能够作到这一点，从理论上说，很重要的原因就在于运用了信息反馈的原理。从而使它既与以前某些经济理论关于控制关系的认识相区别，又与经济计量学等相区别，而显示其优越性，保持其独立性。

第五，应该重视的是，信息处理问题是控制的必要条件，因此，为了实现最优的经济控制，必须建立起相应完善而合理的经济信息系统。

曼内斯库总结了一般模型方法应用的历史经验，提出了经济控制论系统模型的一般制作程序^①（图见下页）。

曼内斯库认为，通常一个模型的制作过程表现为一组三元体 $\{A、S、M\}$ ，A是原系统，主体S在模型M的帮助下对A进行研究，进一步，他将模型的制作过程细分为三个不同的阶段：第一阶段，向模型M传递所有关于被分析系统A的已知信息；第二阶段，在已知的科学工具帮助下对模型M进行研究，以这个方式，人们获得了关于系统性能的新信息；第三阶段，通过研究模型和在实践中使用模型获得的新信息输入系统A。关于具体建模的理

^① M.曼内斯库：《经济控制论》（节译），载《经济研究参考资料》1982年第147期，第50页。

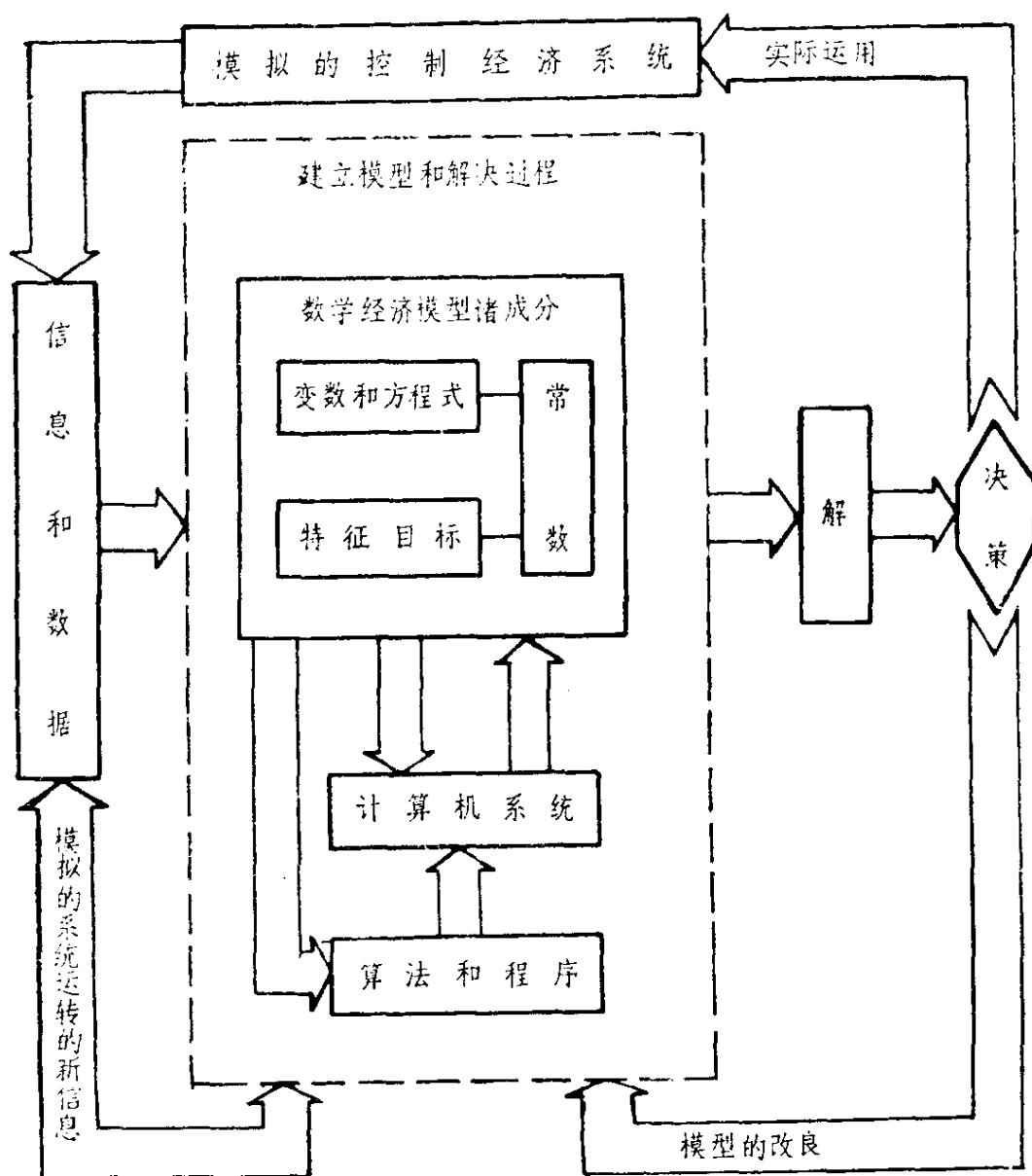


图4.36 系统模型的制作框图

论、方法与实例，超出本书范围，从略，请阅专著。

五、几种宏观经济模型

运用控制论的基本理论可以分析几种宏观的经济控制模式，这就是开环控制模型，闭环控制模型，组合控制模型和组合衰减

控制模型^①。

前已指出，所谓开环控制是指根据需要对被控对象进行直接控制的模型。它是由控制器不断发出指令性的控制信号来达到对目标的控制的。依靠行政命令，指令性计划来组织社会经济生活的计划经济体制，恰如一个开环控制系统，可以图示如下：

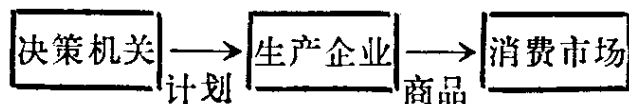


图4.37 开环经济控制系统框图

所谓闭环控制是指能够根据反馈信号不断修正输出的控制信号，使被控对象趋近既定目标，从而达到控制目的模型。市场经济恰如一个闭环控制系统。它通过价格、利润、竞争等经济杠杆自发地调节生产和消费。如下图所示：

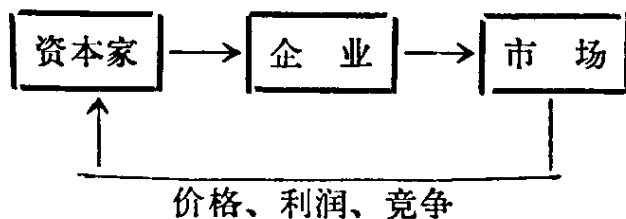


图4.38 闭环经济控制论系统框图

组合控制模型是在开环控制模型和闭环控制模型的基础上，综合发展的产物。在组合控制模型中，既包含计划调节的成份，又有市场调节的机制，因此称为组合控制系统。它的结构如下图所示：

上图可以用来表示，国家在充分考虑市场消费需求的前提下，制定指导性的计划，以尽量减少分散的企业各行其事造成的摩擦和竞争带来的紊乱，企业则在价格、利润、竞争等经济杠杆的作用下，参考国家计划安排自己的生产。也就是一方面借市场

^① 参看叶航：《宏观经济模型的系统分析》，载《经济学动态》1981年第9期，第37页。

机制调动生产者的积极性，一方面弥补计划的不足。

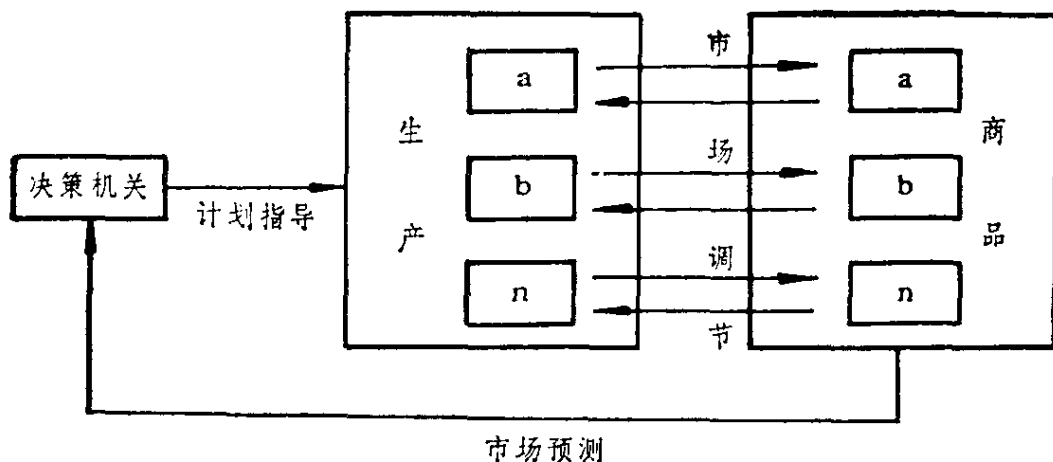


图4.39 组合式经济控制系统框图

组合衰减控制模型是对组合控制模型进行适当的改造，即在小反馈回路上加上一级由控制器操纵的衰减装置，目的是为了压制一部分自调信号，加大反馈回路的信号强度，提高决策机关对整个系统的控制能力，从而改善原模型的质量。其框图见下页。

由图4.40可以表示，决策机关通过“衰减器”——即国家税收、信贷、投资等经济杠杆来加强对相对独立的企业活动的影响，一方面对直接受市场机制调节的企业利润进行适当平衡，减少企业与企业之间的摩擦；另一方面则以此保证重点计划的完成，使国家能够更有效地控制企业的生产，从而大大增强了系统的可靠性和稳定性。

在以上四种宏观经济模型中，开环控制的优点是，控制过程简洁、明瞭，不易产生自激干扰和振荡，所以它能比较有效地保持经济生活的总体平衡。缺点是生产受计划直接控制，很难调动企业的积极性，故生产效率较低。特别值得注意的是，在这种控制系统中，市场完全处于被动地位，所以往往造成经济生活中的产品单一和供求背离，而产生干扰信号。这种干扰信号积累到一定程度，就会反过来干扰生产企业和决策机关，造成整个线路的

振荡。

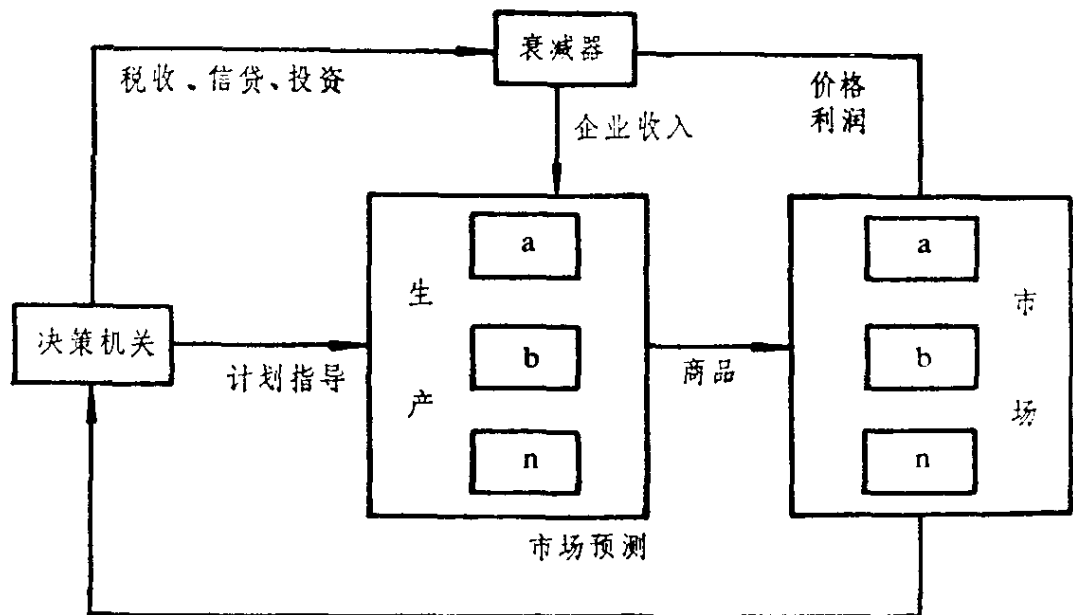


图4·40 组合衰减式经济控制系统框图

一般来说，闭环控制能够保持灵敏的调节，从而达到较理想的控制效果。但是，因为市场经济是由无数分散的小系统构成的，各企业都根据市场信号对自己的生产进行调节，而企业和企业之间却缺乏必要的协调与合作，没有一个纵观全局的“仲裁者”对互相牵制的因素加以协调，便会产生干扰和振荡，破坏系统的稳定，这就是生产的无政府状态。这种干扰经过一段时间的效应叠加，会产生一个强大的破坏性振荡波，使整个控制系统瘫痪。这就是周期性的经济危机。

显然，组合控制比纯计划的开环控制和纯市场的闭环控制有更多的优越性。但是也有缺点，即在控制过程中，如果过份强调国家的统一计划，就会使市场调节功能处于压抑和不充分的状态；如果过份强调市场的自由调节，则价格的波动势必造成生产的波动，从而破坏总体的平衡与和谐，降低计划调节的质量。总之，要使两个对立的机制协调地处于最佳的工作状态，无论在理论上还是在实践中都是十分困难的。因此，组合控制虽然可以取

得较高的效率和增长率，但也显示出经济领域的某种不协调甚至一定程度的混乱迹象。

组合衰减控制的特点是，企业在市场机制的调节下具有独立的权限，但是国家决策机关仍然对整个国民经济作出必要的计划。如果企业计划与国家计划有矛盾，国家则说服它们进行修改。企业对决策机关的意见一般都能慎重考虑，并且加以采纳。如果说服无效，并且确实有关全局和总体的利益，国家则通过税收、信贷、投资等财政手段进行调节。组合衰减控制与组合控制的~~区别~~区别就在于突出了税收、信贷、投资等经济杠杆在社会经济生活中的作用，以此来加强和保证国家计划的实施。因此，它比较成功地避免了组合控制所造成的经济生活中的某些弊端。

以上仅仅对于总体的经济运动进行了一种粗略的控制论描述，现实的情况要复杂得多，因此在实际运用时，要注意作具体的分析。

第四节 智能控制与人工智能

控制论的中心任务之一是要研究智能的模拟问题，也就是要研究将人类的智能，例如自适应、学习、探索等能力引入控制系统，使其具有识别、决断等功能，从而构成比较完善的控制系统，这就是自动控制的高级阶段——智能控制。为了实现这个目标，控制论与自动机、神经网络与脑模型、仿生学、人工智能等学科结合在一起，形成了智能控制研究的多种途径与方法。这其中最主要的是人工智能，它不仅与其它的途径和方法密切相关，而且在一定意义上可以看作是一个总的术语。例如，人工智能是不能离开电子计算机的，它已经成为计算机科学的一个重要分支。并且，它又与控制论密切相关，所谓智能控制中的智能就是

人工智能，正因为如此，有的学者主张人工智能是控制论的实质^①。我们在此不就这种观点加以讨论，而只从它们之间的内在联系出发，来对智能控制的主要途径人工智能加以简略的说明。

一、人工智能的形成与研究进展

智能控制是与人工智能分不开的。所谓人工智能的研究，它采用的是计算机科学的观点和方法，更确切地说，它采用的是计算机软件科学的观点和方法。它的特点是撇开脑的细微结构，单纯进行脑的宏观功能的模拟。人工智能的研究中，又可以细分为两个不同的学派，即数学学派和心理学学派。数学学派完全依靠算法来求解问题，它不太关心机器和人在解决同样一个问题时的各自特点，而只要求获得解这个问题的算法。心理学派则强调世界上最聪明的是人，主张把人在解决各种问题时所使用的方法、策略、经验、技巧等编成启发式程序，依靠它来解决问题。

真正意义的人工智能是在本世纪50年代后半期，即电子计算机的发展已具备进行各种复杂工作的能力时才形成的。但追溯它产生的历史，它是与数学基础和数理逻辑中对算法的研究直接相关的。特别是图灵在1936年进行的工作，对人工智能研究的影响是极其深远的。这一年，图灵发表了他关于一类理想计算机即图灵机的数学表达式。图灵机的提出主要是为了明确数学基础和数理逻辑中关于可计算性的概念，即给出可计算性以确切的定义。他证实了：可计算性与图灵可计算性是等价的，任一可计算的过程能够具体表现在一个算法中，当且仅当它能够被一台图灵机所

① 参看F.H.George: 《The Foundations of Cybernetics》，第1页。

实现。关于图灵机的概念我们在自动机一节中已讲到，这里再从图灵机对人工智能的影响这一角度做些说明。图灵的工作在方法论上最显著的特点在于它实质上是分解人的计算动作。一个人在一张纸上进行计算，要涉及这样一些方面：（1）一种存贮介质，即纸张；（2）一种语言，即能表示数和指令的符号，它们写在纸张上；（3）扫描区，即在每一时刻人们所注视的某些方格；（4）思想状态，即在每一阶段，保留在人的头脑中的计算过程的痕迹，它决定下一步怎么办；（5）进行下一步计算。图灵的这种分析是一种理想化的分析。例如，现实的“思想状态”是一种比较含混的概念，它可以包含许多与计算无关的因素。而图灵把“思想状态”看作是只根据纸张上现时观察到的符号而准备执行某些严格的、有条件的动作的态度，即它只是记录了在整个计算过程中的一个确定的阶段。这样，“思想状态”这个不确定的因素就成为严格的了，并能写在纸张上。图灵这样抽象地分解人的计算动作，得到了若干简单的但在性质上明显是机械的操作，并证明能把它们组合起来执行任意复杂的机械动作。这样，一个算法在质上增加复杂性的问题就变为在量上增加为完成算法所需的存贮量和时间的问题，这就解决了如何设计一种机械性的语言的问题，为计算机软件科学奠定了最重要的理论基础，同时，它也是人工智能的真正理论基础，它对机器在理论上能干什么或不能干什么提供了一个精确的、严格的、机械性的回答。

要给计算机事先编好刻板的固定的算法程序，就要求知道与问题有关的全部信息，而且不考虑计算所花的时间。这在实现时会遇到许多困难。虽然图灵机对机器在理论上能干什么或不能干什么的问题提供了精确的回答，但是人们的哪些活动能实际交给机器去做却是不清楚的。计算机发展的实际需要，引起了心理学界的注意，一批心理学家参与了计算机科学的发展工作，他们主要是从心理学的角度，用心理学的成果来研究人工智能。1956

年，美国的纽厄尔（A. Newell）、西蒙（H. A. Simon）和肖尔（J. C. Shaw）三人提出了一个称为逻辑理论家的程序（LT）。这个程序不是刻板的固定算法程序，而是模拟了人用数理逻辑证明定理时的思维过程、规则和所采取的策略、技巧以及简化的步骤。它在计算机中先存贮一些公理，然后用分解、代入和替换等方法来处理待证的问题，如果这些子问题最终能变换成已知的公理或已证明过的定理的形式，那么这个问题就得证了。纽厄尔等人用这一程序证明了罗素—怀特海《数学原理》第二章52条定理中的38条。一般公认这是用计算机对人的高级思维活动进行研究的第一项奠基性突破，是人工智能研究的真正开端。

就在1936年的夏天，在美国新罕布什尔州海里鲁的达特玛斯大学担任数学助教的麦卡锡（J. McCarthy）和哈佛大学数学系青年教师明斯基（M. Minsky），青年数学家和神经生理学家菲洛（H. Fellow），国际商业机器公司信息研究中心的罗切斯特（N. Lochester），以及贝尔实验室的信息论专家等发起召开了第一次以人工智能为名义的讨论会，这个会议还邀请了纽厄尔、西蒙、塞缪尔（A. Samuel）等在这方面确有研究的专家参加。这个会开了两个多月，会议的主题是探讨人类各种学习和其他智能特征的基础，以及如何在原理上进行精确的描述，以便使计算机进行模拟。这是人工智能发展史中的一个创始性聚会，它标志着这门学科的正式诞生。

这年夏天，除了这个会议以外，在新罕布什尔州还有一个信息论方面的专业会议。会议上报告了纽厄尔等人的LT程序、乔姆斯基（N. Chormsky）的语言理论以及麻省理工学院的赛夫利奇（O. Selfijdge）的字符识别程序。这些都是属于人工智能的重要工作。

在这些会议之后，在美国形成了三个以人工智能为研究对象的研究组织。这就是：纽厄尔、西蒙等人所在的卡内基大学—兰

德公司协助组；以明斯基和麦卡锡为核心的麻省理工学院研究组；以塞缪尔为首的国际商业机器公司工程课题研究组，它们是今天美国几个有名的人工智能研究中心的前身。这些组织为人工智能的研究奠定了重要的基础。

一般人们把1956—1961年这段时期称为人工智能的形成时期。在这一时期，上述三个研究中心分别做了这样一些重要工作。

卡内基大学—兰德公司协作组在LT程序的基础上，又通过心理学的实验，发现了人在解题过程中的更为一般的思维活动。他们把这一过程归结为三个阶段：（1）想出大致的“解题计划”，（2）根据记忆中的理论和推理规则“组织解题”；（3）进行方法和目的分析。西蒙与纽厄尔在《心理学评论》上发表的《人类问题求解的理论基础》一文中阐明了这些思想，这篇论文是人工智能形成时期的重要文献之一。他们基于这一指导思想，在1960年编制了“通用问题求解程序”（GPS），这种程序可以解决如不定积分、三角函数、代数方程等十几种性质不同的课题，从而使启发式程序有了较大的普遍性。另外他们还发明了表处理技术来处理 and 编写LT程序，并做了各种编制程序的革新。

麻省理工学院研究小组在人工智能的早期研究中注重的是形式化的数学表示。他们把人工智能看成是数学和数理逻辑的推广，强调形式化有很大的潜在价值。他们在这段时期的主要工作有：1959年，赛夫利奇在他的第一个字符识别程序的基础上，又提出了有影响的模式识别系统程序。1959年，麦卡锡为了解决问答系统的人工智能问题，开始着手研究适合于非数值问题求解的程序设计语言，并于1960年提出了著名的“LISP”表处理语言。这是一种较好地适用于人工智能的语言，可用于符号、微积分计算、数学定理证明、命题演算、博弈、图象识别等领域。麦卡锡在1958年还提出过一种咨询问答系统，它可以接受知识并利用这

些知识推演出问题的答案，制定出简单的行动计划。这一系统在飞机定票中已得到实际应用。在这段时期，明斯基发表了《走向人工智能的步骤》这篇重要论文。

国际商业机器公司工程课题研究组在这段时期最著名的工作，是塞缪尔创造了具有自改善、自适应能力的跳棋机，他利用对策理论和启发式搜索技术编制了跳棋程序。这种程序不是让机器做穷尽一切可能的探索，而是象一个优秀棋手一样能向前看两三步、五六步，并应用棋手们在实践中摸索到的一些规则，对每一步进行评价，从而成功地达到许多有限目的。1959年，这一跳棋机战败了它的设计者，1962年，又击败了美国一个州的国际跳棋冠军尼亚莱（R.W.Nealey），达到了冠军级水平。这一机器有学习和积累经验的能力，可以记住17 500幅棋谱，从中猜测出书上所推荐的手法。另外，这个小组还编写了几何定理机的程序；建立了符号处理系统 FLPL；创造了最早的国际象棋程序。

以上都是人工智能在形成时期的一些奠基性工作。

60年代以来，人工智能进入了飞速发展时期。尽管这时人们对人工智能还没有一个统一的明确定义，但已逐步明确到这一研究领域的中心任务是如何使计算机去做那些过去只有靠人的智能才能做的工作。它的近期目标是使现有的电子计算机在这方面更为有用；远期目标是探讨智能行为的基本原理，以便进一步加以模拟；更远的目标是建立信息处理的智能系统。围绕这些目标，人工智能逐渐形成了自己的体系。它同现代控制理论、逻辑学、心理学、语言学、算法分析、运筹学、图论、认识论等学科结合在一起，在理论和应用方面都有了相应的目标并取得了重要发展。60年代以来人工智能的发展还表现在研究机构增多、学术活动频繁和文献的丰富上。国际上有了这方面的专门会议和杂志，美、日、英、苏等国家先后建立了一批在国际上有重大影响的人工智能研究机构。近十多年来，美、日、英等国家的所有大学的

计算机系都开设有人工智能课程。

60年代以后，人工智能的研究成果也不断涌现。在自然语言的计算机处理方面，从60年代开始，人们开始研究问答系统领域内的自然语言处理，出现了一些专门格式的程序。如1963年格林（B.F.Green）等人的BAS—EBALL程序，回答关于垒球比赛的各种结果；1968年D·巴布朗（D.G.Bobron）的STUDENT程序可以解答代数定理。70年代初，代号为“施德鲁”（SHRDLU）的系统是这方面最著名的研究成果之一，这是由T·温诺格拉特（T.Winograd）提出的一个理解英语自然语言的程序，它能模仿一个玩积木的人，通过打字机与你对话，执行你的命令，回答有关的问题，在你的话含意不清楚或你的要求客观上不能做到时，它向你反问或解释。1980年，温诺格拉特还专门写了一本书，论述自然语言处理中的计算机制的基础。

定理证明是人工智能领域中的又一极其重要的课题。自从1956年LT程序开创了机器的定理证明以来，1963年，LT程序又得到了改进，它在大型机器上证明了罗素—怀特海《数学原理》第二章中的全部定理。1965年美国数学家鲁滨逊（J.A.Robinson）提出了归结原理，这一原理与西蒙等人的证法相反，它的基本出发点是要证明任何一个命题为真，都可以通过证明其否定为假来得到。归结原理的提出使机器证明获得了重大突破。在定理证明方面比较有影响的还有布莱得索（Bledson）等人，他们在1971年至1977年期间，在分析拓扑和集合论方面搞出了一些著名的定理证明。另外，还有我国的吴文俊，他将几何问题表示为代数问题，于1977年证明了初等几何主要一类定理的证明可以机械化，1978年又证明了初等微分几何中主要一类定理的证明可以机械化，而且找到了实现机械化证明的切实可行的方法。

60年代以后，人工智能获得的又一重大成果是“专家咨询系统”。所谓专家咨询系统，就是把专家们在解决不同问题时的经

验、技巧等编成启发式程序来进行模拟。目前已出现的有“计算机教师”、“计算机医生”、“计算机秘书”、“计算机矿物学家”等系统。与专家系统相关，已日益重视对知识工程的研究。

作为人工智能各种研究课题的综合运用，智能机器人的发展也很迅速。智能机器人具有感知和理解周围环境，使用语言和推理，规划和操纵工具的技能，并且能通过学习适应环境，模仿人完成某种动作。目前许多人工智能研究中心都在大力开展这方面的工作。

总之，经过近20年来的努力，人工智能在理论和应用方面都有了明显的进展，并展示出丰富多彩的前景。现在，日本、美国等国正为研制第五代计算机、智能计算机展开激烈的竞争。这还将影响到军事、政治等多个方面，值得密切注意。

二、智能模拟研究的方法论问题

在说明了人工智能的研究进展以后，本应该具体说明其基本内容，但因涉及到计算机科学中程序语言等预备知识，在此只得从略。对此感兴趣的读者，请参阅有关的专著。在此只就智能模拟的各种途径所涉及的方法论问题加以讨论。

不论智能模拟的那种途径，都要建立智力模型，这就涉及到模型与模拟这样一些基本概念。关于这点我们在介绍控制论的方法时已详细讲过，但为了使以后的叙述更清晰一些，这里仍要补充说明几点。模型与原型之间的关系主要有三方面：第一是相似性，并且这种相似关系要有精确的规定和明确的表达。这里要注意的是，相似这个词的意义是很广泛的，它可以纯粹是外表的，也可以是内部结构的，还可以是行为上的。第二是代表性，即在模拟方法中，模型是研究客体的代表者，我们的直接研究对象是模型。过去人们认为模型仅仅是认识原型的手段，但现在这种看

法已被打破，模型不仅可以在认识过程中代表原型，而且可以在实际的意义上代替原型（在相似的范围內）。因此，模型本身往往也是研究的目的。第三是外推性。这一关系表现在两个方面：一是从模型推得关于原型的信息；二是指扩大相似性的范围，即研究的起点是就一定的相似性而言的，但在研究的过程中人们总力图发现更多的相似性来解释原有的相似性。

智能研究的不同方法虽然都属于智能模拟，但它们在模型与原型的不同关系中又都表现出了自己的特点。下面就对这些方法的各自特点以及它们在实践中相得益彰的效果加以讨论。

1. 行为模拟的方法使智能控制的研究别开生面。

智能控制中不同研究方法的区别首先在于抓取的相似性不同，并且对相似性要求的程度也不同。脑模拟研究的相似性要求较高，这就给它的研究工作带来了一定的困难。因为人脑是我们已知结构中最复杂的结构，单单大脑皮层就有约140亿个神经元，神经元的树突和轴突又构成很复杂的联系组织，并且有许多联系是后天形成的。面对这样一个复杂的结构，要求制造其结构和功能都相似的模型是一个很难达到的目标。麦克卡洛曾讲过，人在复制东西以前，必先占有事实，然而对脑模型的研制来说没有什么比这更难的了。从脑模型研究的真实过程来看，它从来不是一种单纯的仿生学的研究方法，它是深深受控制论、信息论、系统理论的影响的。这些理论从机器和动物的行为类比中给出了生物行为的数学和理论模型，而脑模型研究往往潜在地接受了这些模型。

行为模拟方法抓取的是行为上的相似。可以说行为模拟也是一种分析方法，它是把生命体的结构和属性与其行为分割开来进行研究的方法。图灵的模仿游戏*是一种严格的行为模拟，它是从行为着眼去查问机器活动与人的思维活动是否等效。这种方法是

* 关于图灵的模仿游戏的说明，请参看下章中关于人工智能的哲学问题部分。

有很大意义的。从结构和功能上去模拟思维，这个目标太难，要想有实际效果，必须制定一种切实可行的目标。以后人工智能的发展正是以这种行为模拟为基础的。无论是数学学派用的严格固定的算法，还是心理学学派用的启发式程序，都是进行为了实现一定输出的输入。在任何具体的科学领域，都不会有一种绝对正确的方法或万能的方法。一种方法的生命力在于它是否能开辟一个解决问题的捷径，或是否有解决问题的特色。行为模拟方法之所以能在智能模拟中崭露头角，正在于它把结构意义下的相同和行为意义下的相同作了区分，不完全拘泥于结构决定功能的思想，敢于撇开结构谈功能，进而由功能去探索结构。它不要求知道关于脑的绝对知识，也无须知道脑构造的全部细节，它只要求行为意义上的等效就够了。这就是行为模拟方法的特色所在。

2. 算法理论是人工智能方法的理论基础。

人工智能的核心是问题求解。问题求解的基本方法就是推理法和试探法，更多的情况下这两种方法是综合使用的。

一般来讲，用计算机来自动求解某些智能问题可以归结为三步：

(1) 把实际问题的描述形式化（即符号化）。

(2) 把求解这个问题的过程“机械化”，即把它转化成某种算法或启发式规则（统称为算子），以便机械地去执行。

(3) 自动化，对计算机来说，就是用某种方便的计算机语言把这些算法或启发式规则写成程序，交给机器去自己执行^①。

形式化是思维过程机械化和自动化的前提，是研究人工智能的必要条件。数学中的集合论、图论、数理逻辑和自动机理论都是与思维活动形式化有关的科学。所谓数学模型就是建立一个由有限的命题集合和有限的规则集合组成的数学体系或数学理论。

① 参看何华灿：《人工智能导论》，打印本。

状态空间和自动机都是常用的数学模型（有关的基本概念已在前述的有关章节作过说明）。在这里，为了使读者对形式化有个清晰的印象，简单介绍一下用状态空间使问题形式化的方法及这种方法与人工智能的关系。

为描述某一类事物中各个不同事物的差异所用的最少一组变量 $S_0, S_1, S_2, \dots$ 的有序集合，叫做该事物的状态矢量，或简称状态。记作：

$$S = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ \vdots \end{pmatrix} = [S_0, S_1, S_2, \dots]^T$$

例如，三枚钱币组成的系统可以用一个三维状态矢量来描述， $S = [S_0, S_1, S_2]^T$ ，其中 S_i ($i = 0, 1, 2$) 表示第 i 枚钱币的状况，变域是{正面，反面}，或抽象地记作{0, 1}。设有两个状态 A, B ，它们都是非空集合，如果存在一个规则 f ，使得对任何 $x \in A$ ，都有 $x \xrightarrow{f} y$ 存在 ($y \in B$)，就说 f 规定了一个 A 到 B 中的变换或映射，记作： $f: A \rightarrow B$ 。其中 y 叫 x 在变换 f 下的映象。全体 x 叫 y 的原象。集合 A 为变换 f 的定义域，记作 $D(f)$ ， B 中所有 x 的映象的集合叫做 f 的值域，记作 $R(f)$ ， $R(f) \subseteq B$ 。变换不仅可以在集合 A, B 之间发生，而且可以在集合 A 的内部发生，即 $A \rightarrow A$ 。变换 f 又叫算子，它是引起变化的各种规则、方法或手段的抽象表示。这里要注意的是变换只讨论变化的外在形式关系而不涉及引起变化的内在原因。变换可以有单值变换，即在一个算子作用下，每一个状态只有一个唯一的转移去向，用单值变换可以描述确定型行为；变换还可以有多值变换，即在一个算子作用下，一个状态可以有多个转移去向，用多值变换可以描述不确定型的行为。有了以上这些概念，就可以定义状态空间了。表示问题全部可能的状态及其相互关系的矩阵叫状态空间，在状态空间中包含有以下三

种事件的详细说明：（1）可能的起始状态的集合；（2）算子的集合；（3）目标状态的集合。状态空间可以记为 (S, F, G) 。状态空间问题的求解，也是包含以下三件事情的详细说明：（1）某个起始状态 S ，（2）某个目标状态 g ，（3）把 S 变换成 g 的有限的算子序列 $q_1, q_2 \cdots q_n$ 。 $g = q_n(q_{n-1} \cdots (q_1(s)))$ 。这样，求解问题的过程就转化为在状态空间中寻找从 S 出发到达 g 的路径问题，也就是寻找算子序列 q 的问题。这只是用状态空间把实际问题形式化的最简单的说明，实际情况比这复杂得多。这里要提一句的是，在许多情况下，状态矢量是由若干模糊变量描述的模糊矢量，状态之间的关系也是模糊关系，因此就有了模糊状态空间，这是一个值得深入研究的数学课题。

通过以上对形式化的解释，我们知道所谓问题求解，就是在状态空间中寻找一条从初始状态出发，到达目标状态的路径，或叫做算子序列。例如旅行问题是解决从出发点到达目的地的路线和工具问题。机器人装配机器，就是给出把一堆零件变成一台机器的一系列操作，定理证明就是寻找一条从前提条件到达结论的道路。问题求解的第二步是把问题求解过程机械化。所谓机械化就是研究在状态空间中如何用另外一个算子来机械地寻找从初始状态到目标状态的算子序列。这个算子可以是算法，也可以是启发式程序。算法必须满足这样三个条件，即确定性（其中的任何状态和步骤都必须是精确的、唯一的）；普遍性（算法应能用于解决一整类问题，而不是只能解决某个具体问题）；有效性（对该类中的任何问题，经有限步运算之后，一定可以导致所求的结果）。正是由于这三条要求，一般说来，只有掌握了一类问题的全部信息以后，才有可能总结出算法来。因此算法也叫全信息算子。算法是一个纯数学问题，从某种意义上讲，数学就是研究算法的。数学是把一个具有千丝万缕联系的实际问题转化成一个全信息的具有明确结构的有限状态空间问题。这个空间中的状态和

变化规律都是已知的有限集合。数学就是要为这样的抽象问题寻找算法。数学问题不外乎两种，即数值计算和逻辑推理，目前数值计算是数学中机械化程度最高的部分，大都有了算法或近似算法，用电子计算机求解这类问题也是十分有效的，而逻辑推理的机械化程度则较低，人工智能的重点正是在推理的机械化上。前面提到的鲁宾逊的归结原理就是为定理证明找到了一些效率很高的算法。归结原理首先要求把问题用一阶逻辑表示出来，而且只能判定具有永真（永假）性质的公式。但由于许多问题都可以方便地变为一个定理证明类型的问题，而许多定理又可以变为一个具有永真（永假）性的一阶谓词公式，所以归结原理对讨论问题求解中的算法具有一般意义。算子在逻辑证明中更多地表示为启发式，也有人称为部分信息算子。关于这点在讨论启发式方法的特点时再展开论述。

将问题形式化和机械化后还需自动化。对计算机来说，自动化就是程序化。人工智能的各种理论，最后都要落实在程序上，程序要实现，程序设计就有赖于程序设计语言。人工智能语言的出现不仅丰富和加强了人工智能理论的词汇和表达能力，而且能准确明快地说明人工智能的理论，使它更加形式化和严格化。所以人们说人工智能语言就是人工智能的数学。人工智能面对的主要课题是非数值问题求解，其中包含大量的符号处理和表处理，而人们熟悉的一般程序设计语言都主要是针对数值计算的，在人工智能中使用很不方便，于是人工智能科学家研究了便于人工智能使用的各种形式语言，其中最普遍、最有影响的就是麦卡锡提出的LISP语言。

从以上的介绍可以看出，人工智能问题不仅与数学密切相关，而且与数学基础密切相关。算法、能行性、可计算性、计算复杂性等概念是它重要的理论基础。

3. 启发式程序的必要性。

评价一种方法的价值，不仅在于它理论上的可靠性，而且在于它实际中的可行性。启发式程序正是在这方面显露头角的。在人工智能的研究中，使用最多的是启发式程序这种部分信息算子。这首先是因为我们在许多时候无法知道与问题有关的全部信息，因而无法知道该问题的全部状态空间，因此不可能用一套算法来求解其中的所有问题，只能依靠部分状态空间和一些经验性的规则来求解其中的部分问题。其次，即便有些问题我们知道了其全部信息，并且在理论上找到了求解的算法，但是在工程实践中，这些算法却可能效率太低或根本无法实现，所以人们不得不放弃使用这些算法，而求助于一些经验性的启发式规则。

图灵机是一种算法理论，也是一种理想的计算机，它与实际的计算机之间存在着差距，这是因为：（1）实际机器不可能具有图灵机那样无限长的磁带，能够实际存入机器的信息总量是有限的。（2）任何一台实际机器实行每一个动作，都需要花费一段非零的时间。如果花费的时间很长久，即使这问题在理论上是可能的，在实际上却是没有意义的。所以，计算时间限制着实际机器的解题范围。（3）任何一台实际机器实行每一个动作，都带有非零的概率误差，这就限制了实际机器的解题精确度。

启发的原意是“发明的艺术”或“帮助发明或发现”。它们是一些策略、技巧、窍门或简化步骤，把这些规则编进程序就是启发式程序。对“启发”一词的含义有不同的理解，一种是广义的，凡是有助于解决问题的办法，不管这些办法是否和人有关，都可以叫做启发。还有一种是狭义的、仅指和人有关的一些办法。持启发式方法的科学家们认为现代生理学所提供的关于人脑及其机能的知识还很少，从神经活动到逻辑思维这中间很长的一段是不清楚的，因而他们不模拟脑的结构，不用生理模型。他们还认为，对于人的各种心理活动，现代心理学只知其大概，不详其细节，还没有清楚到足以用数学描述的程度，因而他们也不用

全信息算子的数学模型。他们应用实验心理学的方法，考察人在解决各种问题时用些什么方法，有些什么策略、窍门或捷径，人是怎样想的，怎样做的。他们根据人们的语言报告和行为的表現，总结出思维活动的规律，把这些规律编进程序，作为心理模型，用计算机进行模拟。这种模拟最初可能是粗略的，计算机模拟的结果也可能和人的行为不一致，但经过模拟、修改、再模拟、再修改，可以使计算机的工作和人的行为逐步逼近。

启发式程序的特点在于它不保证总能解决问题，但保证在大多数情况下能够使问题得到较好的解决，而无需大量计算。这个特点使启发式程序成为人工智能中最活跃和最有显著成效的一支。

4. 目前的各种智能模拟方法仍然是以对智能系统的分割为前提的。

控制论和系统科学的方法以整体性和综合性为特点，改变着人们的思维方式。智能模拟作为同这些横断学科密切相关的学科也充分显示了综合性的特点，它对脑和思维的认识不再象以前的解剖学、心理学那样进行机械的分割了，它综合地考察脑的机制和思维的行为方式。但同任何分割是相对的一样，任何综合也是相对的。在今天，我们仍然可以说，没有分割，就没有认识，也无法认识，只是分割的方式变了，它由机械的分割变成一种有机的分割，变成一种同综合交互渗透的分割。目前的各种智能模拟方法仍然是以对智能系统的分割为前提的。这是因为，在今天的知识和技术条件下，要完全模拟人脑这个十分复杂而又善变的系统是困难的，完全的智能模拟只是一个长远的逐步接近的目标。但在一定程度上模拟智能活动的某些特定方面在今天则是完全可能的，这实际就是对智能系统进行分割，这种分割可以是横向的，也可以是纵向的。

在横向上，智能模拟按不同用途把智能系统分为数值计算

机、逻辑推理机、问题解答机、定理证明机、博弈机、图象识别机、各种专家系统等等。

在纵向上，智能模拟则按系统输入 x 到系统输出 y 的算子 T 的变化规律的水平分为不同的阶，阶越高越接近完全的智能系统。所谓0阶智能系统是算子 T^0 在与其存在环境的交互作用过程中不变的智能系统，是智能系统的最简单的近似模拟。它实际上是一个确定型的时序机，或者说是一个固定的程序系统，它对同样的输入刺激只能作出同样的输出反应。也就是说0阶智能系统只是事先记住了某些知识，并能运用这些知识去解决某些特定的问题，但它不能获得新的知识来改变自己的内部状态。在1阶智能系统中，算子 T^0 是可变的，它能按照 T^1 所给的规律变化，但 T^1 本身是不变的。也就是说这种智能系统在与其存在环境的交互作用过程中可以按确定的规则来获得新知识，改变自己的内部状态。由于系统的内部状态可变，所以1阶系统能比0阶系统更好地模拟智能系统的行为。高阶智能系统以此类推。智能模拟正是用有限阶的智能系统来逼近一个完全的智能系统的。目前在智能模拟中研究得最多的是0阶系统，因为在这种研究中，只要找到解决某类问题的算子 T^0 就可以了，但这也并非易事，随着需要解决的智能问题的不同，算子 T^0 有着很大的差异，至今还没有一种统一的有效办法。目前，完成各种数值计算和实时控制用的数字计算机是我们最熟悉的0阶系统，各种逻辑推理机，某些学习记忆系统，以及各种具有确定型结构或工作程序的机器，也都是0阶系统。0阶系统可以有效地模拟各种已经完全定型了的智能活动，因为人们已经掌握了关于这种智能活动的全部知识，无需补充新的知识，所以这种智能活动的规律是确定的，可以找到一种固定的算法来实现它。由于0阶系统无法获得新的知识来提高自己的智能，所以它能解决智能问题是有限的。而通常所遇到的大量智能问题是，人们只知道关于它的部分知识，还需要机器在运行过

程中不断获得新的知识来补充，这就必须研究1阶以至更高阶的系统。1阶系统的算法可以按确定的规律变化，这更增加了研究的复杂性，但它可以比较逼真地模拟智能系统，解决较为复杂的智能问题。目前的许多能自己积累经验、改进自己行为特性的学习系统，都是1阶系统。

从以上的介绍中可以看出，智能模拟方法正是在分割、综合、再分割、再综合的过程中实现对智能模拟的。当然，它的趋势是走向越来越高级，越来越复杂的综合。

5. 各种智能模拟方法的相互渗透和相互补充。

从目前智能模拟的各种方法来看，脑模型方法的局限性较大，这是有认识论上的原因的。由于脑结构和脑功能在相当大的程度上对科学仍是一个“黑箱”，而人工智能的方法则无需知道脑构造的全部细节，只要知道脑是怎样处理信息就够了，对于人工智能来说，重要的是思维得以产生的规律性、思维更替和转换的统计几率等等。这样，相对于脑模型的研究来说，人工智能的目标低，可望又可及，并且手段方便灵活，所以见效快、成果多，自从60年代以来，已逐步成为智能模拟中的主流，特别是启发式方法进展更为迅速一些。

但人工智能绝不能取代脑模型的研究。人工智能着重的是行为的等效性。行为相同在逻辑上蕴含着其它方面（特别是结构）可能相同也可能不同，人们的认识往前发展，必定要追究行为相同的原因。从目前的状况来看，电子数字计算机与脑结构之间有着巨大的差别，如人脑是由巨量的基本单元组成，以并行处理为主，具有结构可塑性和遵从连续值逻辑等，相比之下，目前的电子计算机就太简单了。人脑的某些复杂功能，不适于用它来模拟。只有把脑功能和脑结构密切结合起来，才有可能解决一些复杂脑功能的模拟问题。因此脑模型研究仍然是一个十分值得重视的方向。并且，脑模型研究近些年来也有很大进展。脑模型研究

的进展直接依赖于膜生理学、突触学、神经生理学、神经解剖学的进展。近年来，由于微电子等技术的应用和改进，围绕着中枢突触传递机制的研究已取得了很多新进展，人们对于神经系统的结构与功能的认识水平都大大提高。例如神经解剖学，过去被人们认为是一个古老和垂死的学科。但由于新技术的引进，它也是一跃而成为现代最活跃的学科之一。另外近年来神经科学领域内一个重要的发展就是利用体外培养的活的脑细胞进行神经元结构与功能的研究，它将为脑的基本理论的研究开辟一条新的道路。因此脑模型的研究还会在这些学科进展的刺激下持续发展下去，并可能出现大的突破。

因此，在以后的一个时期中，脑模型研究和人工智能的研究还会平行发展，各显其长。这里特别值得一提的是冯·诺意曼的《计算机和人脑》一书。这本书是冯·诺意曼在1955年到1956年准备讲演用的未完成稿，1958年发表。这本书是电子计算机理论研究中的重要文献之一。冯·诺意曼在这本书中从数学的角度，主要是从逻辑和统计数学的角度，探讨计算机的结构和人脑的结构，探讨计算机的运算和人的思维过程，从这两个方面对计算机和人脑进行了比较研究。他认为计算机和人脑有相似之点，也有不相似之点。他特别强调：“这些相异之处，不仅存在于大小尺寸和速度等比较明显的方面，而且存在于更深入、更根本的方面，包含：功能和控制的原理、总体的组织原理等等。”^①他认为，人脑的“逻辑深度”和“算术深度”都比计算机小得多，但有许多现代计算机所不能比拟的优越性。比如，同样容积的神经元比人造元件能完成更多的运算，能同时处理更多的信息，记忆容量也大得多，每个神经元件的准确度较低而其综合的可靠性较高等等。冯·诺意曼进行这些比较研究的目的在于促进对神经系

① 冯·诺意曼：《计算机和人脑》，商务印书馆1979年版，第29页。

统和对电子计算机的研究，使二者的研究更加紧密地结合起来。这本书对脑模型研究和人工智能研究都有重大的意义。

三、从智能控制到智能科学

智能控制为人类研究智能开辟了一个新途径。它的深入发展又要求更高一级的整体化和综合化出现，这就是智能科学，这应该是一门范围更加广泛的具有划时代意义的新学科。它目前正在酝酿中，人们对其应包括的内容，它出现的意义已有一些讨论。

现在，人们越来越感到：智能科学的出现将改变整个科学的内部结构和研究风格，为新的工业革命奠定理论基础。目前，信息处理的问题日益突出，人类智力的局限性日益暴露。而新的工业革命的目的是要突破人类智力的局限性，为高效能信息处理系统的建立和使用寻求理论基础。这场革命的核心问题是智能，其理论成果就是智能科学。这场革命将使部分脑力劳动自动化，工业社会过渡到信息化社会。因此，智能科学在新的工业革命中的主导地位是毋庸置疑的。

钱学森在1981年初提出了相当于智能科学的思维科学的概念。他提出逻辑学、形象思维学、灵感学都是属于思维科学这一科学技术大部门中的基础科学。语言学、文字学、密码学、人工智能、计算机软件技术、图象识别技术等，是思维科学体系中的应用技术^①。

当然，这些讨论还处于设想性的阶段，有关的研究正逐步展开。我们及早地认识这一科学发展的趋势，加强研究，是十分必要的。

^① 参看钱学森：《系统科学、思维科学与人体科学》，载《自然杂志》1981年第1期。

第五章 控制论的哲学与方法论问题

第一节 有关问题的历史回顾

控制论与哲学有着密切的关系。从科学史与哲学史来看，尽管科学早已从哲学中分化出来，但科学与哲学的联系却并未因此而中断。二者总是有意无意地、有亲有疏地相互影响着，这是众所周知的事实。我们在这里不仅是在这个意义上一般地指出控制论与哲学的关系，而且特别强调它们之间这种关系的密切性。这种密切性是由控制论的学科性质所决定的，也是由当前科学发展的整体化和相互渗透的趋势所决定的。控制论与哲学的密切联系以及它所提出的一系列方法，又使得它具有了方法论的性质与特点。

本书前面的一些章节已经指出过，在控制论形成的过程中，哲学和方法论的讨论对于其理论观点的形成和自动机的研制起过重大的启示与指导作用。控制论的一些主要创始人，如维纳、罗森勃吕特、图灵、冯·诺意曼、艾什比等人都是很有哲学修养的。维纳是罗素的学生，他把莱布尼兹称作是控制论的“守护神”，认为他对自己的理论观点起过深远的影响，同时，特别在社会观方面，他又受着存在主义思潮的影响。维纳的一系列有关控制论的论著几乎都在相当的程度上涉及到哲学与方法论问题。

自从1943年维纳等人在美国的《科学的哲学》杂志上发表了《行为、目的和目的论》以来，尤其是从1948年控制论被宣告诞生以来，首先是在美国，接着就逐渐在世界范围内引起了对控制

论、信息论与电子计算机的有关哲学与方法论问题的探讨与争论。由于控制论这类学科的一些特点，首先所涉及的是关于控制论的研究对象、学科性质及其意义、评价等问题。其中最根本的是评价问题，也就是对控制论是持肯定还是持否定态度的问题。50年代前后，苏联的政治界与学术界在这一问题上曾经历了一个明显的转变。一个最突出的例子就是苏联著名数学家柯尔莫戈洛夫的转变。他在1956年10月的苏联科学院自动学会议上和1957年4月在莫斯科召开的数学会议上都发言否定控制论。但到1957年10月，他在《数学科学成就》第12卷4期上发表的《什么是控制论》一文的提纲（后来收入《苏联大百科全书》第51卷[1958]）中则转而持肯定的态度。接着，他在1961年发表了《自动机和生命》一文，提出了机器与思维问题上在当时看来是很新奇甚至荒谬的观点，并由此引起了一场激烈的争论。同样，在欧美国家中也曾有一些人对控制论持否定或怀疑态度。但总的说来，这种否定、怀疑的思潮是短暂的，特别是有的教会人士把控制论咒骂成“淫荡的唯物论的产物，它剥夺了上帝赐给的灵魂”^①，更是荒谬的，没有生命力的。在50至60年代期间，与否定的思潮相并行的还有“唯控制论”、“唯信息论”等，后者较之前者更为突出。但这种片面夸大的思潮也只流行一时，并没有带来长期的不良影响。经过这些不同观点的争论与探讨，控制论这一学科得到了普遍的承认，对其意义与评价也逐渐有了比较切实的认识，而这与人们对其研究对象、学科性质的深入认识有关。因此，这类问题是属于较早期的问题，现在已大体上解决了。

控制论的技术任务是要研制能够模拟智能的自动机。由此就很自然地提出一个重大的哲学问题，即机器与思维的关系问题。

^① 转引自B.Д.别克利斯：《人、控制论和上帝》，载苏联《科学与宗教》杂志1960年第2期。

早在1950年，图灵就发表了《计算机与智能》的论文，1958年，冯·诺意曼发表了《计算机和人脑》，还有维纳和艾什比发表的一些有关论著都是为了探讨这个问题的。30多年来，这是争论得最激烈的一个重大问题，至今还在继续，没有得到完满的解决。

与这个问题地位相当的另一个重大问题就是控制论与社会的问题，即控制论能否运用于社会领域？它如何应用于社会领域？需要什么条件？能运用到什么程度？这些问题曾引起相当广泛的争论与忧虑。但30多年来的实践已对这些问题作了肯定的回答。现在，对这个问题的探讨已经从一些原则性的争论进入到一些具体问题的探讨，并且日益显示出深远的意义。

如果说上述两大问题，即机器与思维、控制论与社会的问题对人类社会具有重大的实际意义的话，那么与控制论有关的信息熵和生命问题则是一个具有深远意义的重大理论问题。维纳在《控制论》一书中，从一开始就提出了时间对于牛顿力学定律的可逆性和对于生命系统的不可逆性这个重大的理论问题。尤其是信息量公式与热力学熵公式的形式相似而符号相异，更引起了理论物理学家、理论生物学家和控制论、信息论学家的浓厚兴趣与密切注意。不仅维纳在很多著作中论述和探讨过这个问题，而且如物理学家布里渊（L.Brillouin）等也研究过这个问题。这个问题已经超越控制论与信息论的范围，日益与一般系统论、耗散结构理论、协同学等新兴分支相互渗透，成为当前有待突破的一个重大理论问题。由于这个问题不仅与控制论有关，而且与信息论、系统科学有关，因此，有关的哲学问题只能放到本书第三篇中加以比较系统的论述。

在欧美或苏联、东欧国家中，对以上几个问题都引起广泛的重视与探讨，不仅如此，对于我国和苏联、东欧等国家来说，还要探讨马克思主义哲学与控制论的关系问题。苏联在1950年才转而对控制论持肯定态度。最早发表的肯定性文章是索波列夫、基

托夫、良普诺夫的《控制论的主要特征》，这些作者都是科学家。从此以后展开了对有关哲学问题的热烈讨论。就较大规模的讨论来说，有1957年苏联科学院神经学研究所举行过的有关控制论与神经学、心理生理学关系的讨论。1960年在一些杂志上展开过有关哲学问题的讨论。1962年苏联科学院召开过控制论哲学问题的联合理论会议，参加人数上千人。除苏联外，东欧一些国家中，如民主德国的G.克劳斯、保加利亚的T.巴甫洛夫、捷克斯洛伐克的泽曼等人都发表过不少论著。我国在50至60年代也开始重视这一研究的进展，但在“文化大革命”中受到干扰，直到“四人帮”倒台后才重新在更广泛的范围内受到重视，并取得了一定的进展。总的说来，控制论与马克思主义哲学的关系主要表现在两个方面，一方面是要指出控制论在哪些问题上加深了对马克思主义哲学原理的论证，另一方面是如何运用马克思主义的哲学原理去探讨控制论所提出的一些新的理论问题。就后者说任务更为艰巨，尚有待进一步加以探讨。

除上述问题外，哲学中方法论的问题也是一个重大的课题。苏联有的学者认为近年来人们更注意控制论的方法论问题^①。这与控制论的广泛应用有关。

本书将在以下几节分别论述上列的问题。限于条件，难以进行全面的论述，而只能就一些主要论点加以概述。

第二节 控制论的研究对象与特点

对什么是控制论的研究对象，学术界至今没有取得一致的看

^① 参看H.T.阿勃兰莫娃：《控制论的哲学问题》，载苏联《哲学问题》1981年第3期。

法，也没有一个公认的定义。由此，对其特点的认识和表述也就各有侧重，很难求得统一。

维纳在他的《控制论（或关于在动物和机器中控制和通讯的科学）》的书名中，就明确地表示出了控制论的研究对象是生物领域和技术领域中都存在的控制和通讯过程。在这本书的最后一章，他不很确定地提出一个建议，说控制论也许可以用来研究社会现象和思维现象。其后，他在《人有人的用处》一书中又进一步指出，控制论是对于机械、生物体和社会消息中的某种同构性的分析研究。从维纳的定义看出，他的出发点是承认电子计算机、生物体、人类社会和思维之间存在着一定的相似性，这种相似性集中表现为它们都存在着控制和通讯的过程。我们可以这样来通俗地理解他所说的同构性，控制论的研究对象就是关于自然、社会和思维的控制和通讯的共同规律。

维纳自己曾讲过：“我用‘控制论’这个词标志这一个问题领域，是出自一个简单的原因，我在今天的生物科学和工程科学进行研究的那些过程中，找到了许多相似的东西，因而力图使用这样的词汇，把不同的相似性表示和指明出来，否则在这一领域进行的工作就会混杂不齐并缺少对问题的最基本的共同的理解。我的目的就在于把各个科学领域中进行的努力联合起来，使它们都致力于对相似的问题的划一的解决。”^①

维纳以机器和动物中的这种相似性为控制论研究对象的认识在以后有所发展，他越来越明确地指出，控制论的任务就是研究能模拟大脑某些机能的机械装置的可能性和可靠性问题。1960年，在莫斯科举行了国际自动控制联合会、国际自动控制与自动调节联合会第一次国际会议。维纳参加了这次会议。在会下同苏

① 苏联《哲学问题》编辑部：《N.维纳在我们杂志编辑部》，载《控制论哲学问题译文集》第一辑，第27页。

联哲学家和科学家的座谈中，维纳曾讲过使他感兴趣的首先是会“思想”的机器和能够建造其它机器的机器。他认为控制论所面临的最主要、最迫切的问题是“研究自行组织系统、非线性系统以及同生命是怎样一回事有关的那些问题。但是所有这些——三种提法说的是同一件事”^①。维纳的这种观点在以后西方对控制论对象的认识上有很深远的影响。

关于控制论研究对象和特点的另一经典性观点是艾什比提出的。他对控制论研究对象的定义同维纳的定义是并行不悖的，只是出发点和表述的重点略有不同。艾什比的定义的一个特点在于他特别强调系统的行为，他认为：“有许多书的书名叫‘机器理论’，讲的往往是一些机械方面的物件，如杠杆和齿轮之类。控制论也是一种‘机器理论’但它讲的不是物件而是动作方式。它并不深究‘这是什么东西？’而要研究‘它做什么？’因此，控制论中很重视象‘这个变量作简谐振荡’之类的话，而对于这变量究竟是一个点的位置还是电路中的电势，却远没那样重视。因此，控制论本质上是研究机能和动态的。”^②

在此基础上，艾什比进一步讨论了这种“机器理论”的特点：

（1）控制论与现实机器的关系是几何学与现实空间中具体对象的关系，它是以一切可能机器为其研究对象的，至于其中有的机器有没有被人或自然界创造出来则是次要的。（2）控制论研究的是一种理论的、抽象的机器。这与数学、物理学中研究一些理想系统在方法上是一样的。在给定某一机器时，控制论通常不关心这部机器此时此地的变动形式是什么，而关心它可能有的全部变动形式是什么。这就是说，它所研究的是“一批”可能性，而

① 苏联《哲学问题》编辑部：《N·维纳在我们杂志编辑部》，载《控制论哲学问题译文集》第一辑，第26页。

② 艾什比：《控制论导论》，科学出版社1965年版，第1页。

这正与信息论相关,由此引出了这一机器理论的又一特点。(3) 控制论是以信息论作为基础的。他说,“控制论也确实可以定义为:它是研究这样一类系统的科学,在这类系统中能量无关紧要,而信息及控制却非常重要”^①。(4) 控制论是研究复杂系统的。他认为过去人们受“每次变动一个因素这种研究方法的束缚,实际上这是不现实的,一个系统中各种因素具有很大的能动性,而且彼此间又有密切的联系,以至变动一个因素,就会立即引起别的一些因素的变动。他认为今日科学已到了研究复杂性的时代。对比较简单的系统来说,控制论方法并不比那些过去的方法有显著的优点,只有在研究复杂系统时,控制论才显出它的优越性来。艾什比强调控制论研究复杂系统同维纳的出发点是一致的,认为机器、大脑和社会之间,有许多有意义的相似之处,研究复杂系统,一方面要使机器具有大脑的某些功能,另一方面要通过对复杂机器的研究促进对大脑和社会研究的进一步深化。

60年代前后,控制论逐步成为一门比较完整的科学并被人们普遍接受,这时,有许多人开始研究这门科学的一些理论问题。其中,对它的研究对象和特点也有了较为详尽和专门的讨论,比较有代表性的有这样一些观点:

一种是60年代在东欧和苏联流行的观点。1963年版的罗森塔尔和尤金主编的《哲学辞典》中,控制论被定义为“是关于技术设备、生命机体以及人类组织中的控制过程 and 控制系统的一般特征的科学。”^②这基本上是沿用了维纳的说法。

捷克斯洛伐克的柯尔曼(A. kolman)是在苏联《哲学问题》杂志上,首批肯定控制论的哲学家之一。他认为:“控制论是一门

① 艾什比:《控制论导论》,科学出版社1965年版,第4页。

② 罗森塔尔、尤金:《哲学辞典》,1963年俄文版中的“控制论”条。

科学理论，它研究具有十分不同性质的，但是从量的形式来说又是相似的，因此能够加以统一处理的各种过程。”^① 这里，他强调控制论的研究对象是存在于不同系统中的量的相似性，由此，他把控制论定义为是“信号和机械控制的数学理论”^②。

苏联数学家索波列夫等人认为，控制论“是关于自动机器与生物体中控制与通信方面一些共同问题的各种理论、假说和观点的总和”^③。他们认为控制论由三个基本部分组成：（1）信息论，主要是关于信息的加工和传送的统计理论；（2）自动快速电子计算机的理论，即与人类思维过程相似的自动组织的逻辑过程的理论；（3）自动控制系统的理论，主要是反馈论，包括从功能的观点对生物体中神经系统、感觉器官与其他器官的工作过程的研究。实际上这三个部分分别指控制论的信息观点、计算机工具和反馈的方法。他们认为控制论发展的全部历史都服从于一个目标，这就是把对信息的多种利用转让给技术装置，换句话说，也就是把许多智力的功能交给机器来担当。

索波列夫对控制论研究对象的认识同维纳的出发点是基本一致的，但他认为把控制论原理推广到人类社会方面去是没有根据的。另外有些科学家，如T·巴甫洛夫等把控制论的对象限制得更狭窄，他们认为生物体中的控制和操纵问题也不在控制论范围之内，控制论只是关于电子计算机的制造和使用的数学理论。苏联与东欧学者早期的这些观点表明，他们虽然对控制论持再定态度，但对它的理解是相当狭窄的。

① 柯尔曼：《什么是控制论》，载《外国自然科学资料选辑》第四辑，第22页。

② 同上。

③ 索波列夫等：《控制论的若干基本特征》，载《外国自然科学资料选辑》第四辑，第41页。

到70年代，苏联和东欧一些国家的代表性观点较50年代有较大进展。例如，茹科夫（Н.И.Жуков）认为控制论并不是一门普通的专门科学，它所研究的对象是一种抽象的功能系统，这与一切具体的技术、生物和社会系统是有区别的。在这个意义上，控制论是一种新的方法，甚至“应当首先把功能方法本身当作是控制论的对象，以这个方法研究组织界的各种系统——生物机体、机器装置和人类集体。”^①由此可见，他强调了对控制论研究的功能特点，并把功能方法也作为研究对象来考虑，强调了对控制论的方法论意义。当然，严格说来，方法与对象是有区别的。其次，由于控制论要求进行数量化的研究，所以它与数学的关系十分密切。但能不能把控制论本身作为一门数学呢？这个问题涉及到它的学科性质与研究对象的问题。茹科夫专门讨论了数学与控制论之间的关系问题。他说：“控制论被数学渗透，但它不是数学的一个分支。控制论有自己的对象。就研究对象的范围而言，理论控制论处于抽象的数学与其它具体科学之间。使理论控制论同数学接近的原因是，理论控制论在研究控制论系统作用的原理时，使它们脱离了对物质某种形式运动的‘从属性’，也不考虑它们的质的特点。”^②另外，茹科夫还从控制论和哲学的关系的角度进一步明确了控制论的研究对象。他认为，控制论和哲学不同，它的研究对象仅仅局限于物质体系中的控制和信息的过程，并且，控制论远不是研究世界上一切客体，而只是研究有一定复杂性和组织性的系统，因此，控制论的对象比哲学的对象要狭窄得多。

再有一个是列尔涅尔的观点。他用更一般的语言指出，“控制论表示一种能应用于任何系统中的一般控制理论。”^③这里要

① 茹科夫：《控制论的哲学原理》，上海译文出版社版，第28页。

② 同上，第38页。

③ 列尔涅尔：《控制论基础》，科学出版社1980年版，第1页。

注意的是，列尔涅尔认为控制论不是一般地研究一切系统，而是运用控制论的方法研究一切系统中的控制过程。他着重区别了控制系统和控制论系统：控制系统是指客观上存在有控制过程的一切系统，而控制论系统则不仅取决于这个系统本身，还取决于研究这个系统的工作者的观点、方法和目的。列尔涅尔的这一区分在于说明控制论的对象是研究客体与方法的有机结合。

民主德国哲学家克劳斯的观点也是具有代表性的。他关于控制论研究对象的想法直接来源于艾什比，认为控制论是一种机器理论，但它研究的不是蒸气机、电动机、飞机、火箭，也不是电子计算机，但也可以说它对这些机器都进行研究。它不研究它们的构成，而研究它们做什么，并且“控制论不仅研究现存的和已知的机器的行为方式，而且要成为关于可能的机器的行为方式的理论”^①。进一步，“控制论还从这个基本出发点上升到理想机器、理想动态系统、这种系统的各个类型和理想行为方式”^②。

在这个定义的基础上，克劳斯阐述了控制论和哲学在研究对象上的联系和区别。他认为，“控制论的研究对象不是物质的特定结构或运动的特定形态，而是普遍的结构与行为方式，因而控制论的规律就是现实世界的普遍规律，而不象生物学、物理学、数学、天文学或政治经济学的规律那样，只是现实世界的某个领域的规律”^③。但他认为，相对于哲学来说，它研究的规律又具有特殊性，例如，控制论并不研究一般的联系，而是研究动态系统与子系统的联系；它也不研究一般的运动，而只研究受控自调

① 克劳斯：《从哲学看控制论》，中国社会科学出版社 1981 年版，第 2 页。

② 同上，第 10 页。

③ 克劳斯：《从哲学看控制论》，中国社会科学出版社 1981 年版，第 11 页。

系统的运动。因此，克劳斯认为，控制论带有既是哲学又是具体科学的双重面貌。

克劳斯在其一系列论著中所发表的关于控制论对象的观点，在东欧与苏联等国引起过一场比较激烈的争论。由于他认为控制论具有普遍性以及由此主张唯物辩证法要成为一种“实验辩证法”的提法，使得一些学者批评他企图用控制论代替马克思主义哲学。但他本人并不同意这是一种代替，而只认为“控制论非常接近于哲学”^①。

这场争论不仅涉及控制论的研究对象问题，实质上涉及到控制论的学科性质以及在科学分类中的地位问题。有人认为控制论是一种类似于物理学中振动理论的学科^②，有人认为它类似于数学，有人认为它具有具体科学与哲学的双重特点。现在，一般认为控制论是一种横断性的科学，它所研究的既不是具体科学的特殊规律，也不是哲学所研究的一般规律，而是研究具有普遍性质但又有范围限制（即只在某些方面适用）的共同规律。

在西方，对于控制论的对象也有各种不同的理解，其中比较有代表性的观点是强调人工智能是控制论的核心部分。美国人乔治（F.H.George）在他1972年发表的《控制论基础》一书中开宗明义地讲到：“控制论从技术和理论两个方面研究控制和通讯系统，研究控制和通讯在动物和人中间的发生过程。在某种意义上，控制论的基本问题是‘能使得机器思维吗？’但在另一种意义上又不是这样，而是如何使得机器能为我们做许多复杂的事。这个观点也就是说一方面我们可能想知道我们是否能制造比人更有

① 转引自梁志学：《克劳斯对控制论哲学问题的研究》，载《自然科学哲学问题丛刊》1979年第1期。

② 参看B.斯维特兰娜：《评介控制论的哲学问题》，载匈牙利《哲学评论》1962年第3期。

理智的机器，或我们仅仅想利用自动化控制系统为我们提供任何有效的帮助。”^①他还讲到：“控制和通讯的科学，也是人工智能的科学。”^②“控制论的基本问题之一就是模拟和综合（synthesis）人类智能问题，这是控制论的焦点。”^③乔治的这种表述显然是沿袭了维纳的说法，并且根据人工智能的发展而加以综合的。

从以上综述来看，对于控制论的研究对象有着各种各样的说法，这些定义在表面上的差别，给人造成一种似乎很混乱的印象。但是，如果认真分析一下关于控制论的经典性著作和以后的科学文献，既看到这门科学的定义，又注意它的具体内容；既看到它在特定时期所强调的重点，又注意到它的历史发展，那么，我们就会看到，控制论是一门有着确定的研究对象和研究特点的严整的学科，不同的定义及其难免的片面性反映了控制论对象的不同方面。

第三节 人工智能中的哲学问题

控制论中的一个重要任务是研究智能模拟，由此，它提出了一个非常重要的哲学问题，即机器思维问题。从40年代末、50年代开始，这个问题在国外一直争论得很激烈。这一争论不仅波及哲学界、科学界，而且波及社会学界、文学艺术界以及政治界和经济界。近年来，关于这个问题的讨论在我国也热烈起来。由

① F.H.George: 《The Foundation of Cybernetics》, 1972, P. 1。

② 同上，第261页。

③ 同上，第183页。

于这场争论持续时间长，涉及领域广，提问题的方法和角度多样化，所以就给理清这一问题的来龙去脉造成了很大困难。这里，我们只介绍一些主要之点。

1. 图灵的意见。

要搞清机器思维问题的来龙去脉，仍须追溯到图灵。1950年，英国杂志《心》上发表了图灵的著名文章：《计算机和智力》。他的这篇文章把机器能否思维这一问题明确化、尖锐化，在世界很多国家引起了巨大的反响，引起了关于机器能否思维的长期广泛的争论。以后人们在讨论这一问题时，往往追溯到图灵的这篇文章。

维纳说：“图灵也许是第一个把机器的逻辑可能性作为一种智力实验来研究的人。”^①这主要是指图灵在这篇文章一开始提出的那个著名的模仿游戏 (imitation game)，图灵企图以此来代替机器能否思维这一思辨问题。

图灵的模仿游戏是这样的：玩这个游戏的有三个人，一个男人(A)，一个女人(B)，一个询问人(C)，这个人可以是任何性别的人。询问人呆在和其他两个人相隔离的房间内。询问人在游戏中的目的是要决定其他两个人哪一个是男的，哪一个是女的。他只知道那两个人的符号是X和Y，在游戏终了时，他说“X是A和Y是B”或“X是B和Y是A”。现在的问题是将一个机器代替了这个游戏中A的角色，当游戏继续进行时，询问人是否同以前一样，也经常被两个被问者所迷惑。果能如此，我们就可以说这一机器是具备思维能力的。

要正确理解图灵的这一模仿游戏，需注意这样几点：(1) 图灵认为他的这一游戏在体力和智力之间划出一条十分明确的界限。在游戏中，不允许询问人看到或接触到两个被问者，也不允

① 维纳：《控制论》第2版，科学出版社1963年版，第13页。

许听到他们的声音，因此思维机器可以是任意形状的，并且机器可能不能和人媲美，人也可能不能和机器比持久力，但他们作为答问者却可以随心所欲地吹嘘他们的美貌或气力。因此图灵认为他的这一游戏是纯智力的实验。（2）图灵认为他设计的机器的目标在于尽可能地模仿人。因为对于机器来说，最好的战略可能并不是模仿人的行为，但这里假设，对于机器，最好的战略是尽可能作出一个人会理所当然地作出的那种回答。（3）图灵对“机器”这一概念做了明确的规定：允许把任何一种工程技术应用到这种机器上来；工程师可以设计这种机器，但可以描述不出它的运转方法；用生物方法生殖和培养的人不算机器。图灵的这三个规定实际是说明他的机器就是指电子计算机。图灵自己也明确讲过这一点。（4）图灵特别强调：“我们不是问是否一切数字计算机可以把游戏玩得很好，也不是问现有的数字计算机是否可以玩得很好，问题却在于是否存在理想的计算机。”^①

通过图灵以上的解释和说明，我们可以看到图灵的模仿游戏实际上是个算法问题，即是否存在（现实的或潜在的）解决用模仿游戏的术语描述的那种涉及大量事件的算题的算法。

图灵的这篇文章是现代机器思维问题讨论的真正开端。他在提出他的模仿游戏和机器能够思维的论题的同时，还列举了当时一些主要的反对意见，逐一进行了批驳。图灵当时归纳了九条，我们可以再归纳为五个方面：

（1）神学方面的反对意见，即认为思维是人的不朽灵魂的功能，上帝把不朽的灵魂给予了人，而没有给予别的动物和机器，人是万物之灵。图灵认为这种意见不值一驳。

（2）数学方面的反对意见。这种意见是以哥德尔定理为论

^① 图灵：《机器能够思维吗？》，载《控制论哲学问题译文集》第一辑，第104页。

据的。关于哥德尔不完全性定理我们在前面已有过介绍。反对机器能思维的人认为哥德尔不完全性定理是对机器能力的一种限制。因为他们认为机器解决问题是必须把问题彻底公理化和形式化，这样，定理的推导就不必再依靠空间关系，不必再依靠直觉，而可以纯粹机械地推演。每步推演表现为由一个逻辑式子变成另一个逻辑式子。按照哥德尔不完全性定理，这将必然能找到一个命题和它的否定在具备一定条件的系统内不能得到证明。图灵认为这种反对意见只是说明了任何特殊机器的能力是有限的，但对于人类智力，哥德尔定理是否也适用呢？图灵认为这种反对意见只是叙述了这类限制不适用于人类智力，而对此并没有进行证明。图灵认为，可能有许多这类问题不能由一个机器作出回答，却可以由另一个机器作出回答。我们相对于一个机器能获得微小的胜利，而要相对于一切机器都同时获得胜利，不可能没有问题。总之，有时也许有人比任何一个机器聪明，但有时也许又有别的机器比人更聪明，如此反复类推。

（3）不可知论的意见，这种意见认为人的行为是无规律可寻的，因此行为也不能形式化。图灵认为这是一种静止的认识观。

（4）从机器的种种无能出发的意见。这些意见列举了机器的种种无能的表现。例如，机器能思维，但不能意识到自己在思维；机器不能犯错误；机器不能有出乎人意外的行为；甚至机器没有美貌，不能谈恋爱，不能欣赏美味等。图灵认为说机器不能意识是唯我主义者的观点，因为你要知道一个人自己是否意识到自己在思维，只有成为那个特定的人才能做到。至于机器不能犯错误，有人主张在模仿游戏中，询问人只要提出许多算术问题就可以把机器和人区别开来，机器由于它死板的准确性，就会露出马脚。图灵对这种主张的回答是，对于这些算术问题，机器不会竭力作出正确的回答，它会在计算中引入一些错误来迷惑询问人。

至于机器不能有出乎人意料之外的行为，图灵认为这种观点来源于一种对哲学家和数学家特别有影响的谬论，即一旦把某个事实记在心中，那么关于这个事实的一切后果也随着它同时进入心中了。图灵认为这是一个虚假的假设，在真实的认识过程中，人们并不能预期一切，对机器的所作所为也如此。对于机器的其它无能表现，图灵认为就没有反驳的必要了。

(5) 从神经系统的一些特点出发的反对意见。这种意见认为神经系统是连续的，而不是离散的，因此不能用离散状态机来模仿神经系统的行为。图灵认为，离散状态机和大脑的结构不同是当然的，但在模仿游戏中，它们却不会影响它或他对问题的回答。还有人用人有超感觉的知觉为理由反对机器能思维，图灵认为那样询问人就可以由于天眼通而不需提任何问题就能猜对被问者是什么，那么他的问题也就没有意义了。

图灵的反驳带有英国人的幽默和机智，并且有些是很思辨的，不一定完全可取，但有些对于人们思考问题还是有启发意义的。在以后30年的讨论中，许多反对意见仍然没有超出图灵当初归纳的这几种，许多实质相同而形式不同的反对意见仍不断出现。但是，虽然问题没有变，问题的内容却极大的丰富和发展了。下面我们就介绍一些争论的主要焦点和主要的不同意见。

2. 关于什么是思维。

关于机器思维中的机器的特定含义，我们在介绍控制论的产生时已讲到了。每一个科学家和哲学家对机器能否思维的回答还依赖于他们对思维概念的理解和定义。申农曾讲过，机器能否思维的答案完全依赖于我们如何定义思维，如果对这个概念的内涵没有准确的和一致的意见，那么对问题也就没有肯定的回答。

控制论的创始者们对思维采用了行为主义的定义方法。申农曾讲过，从行为主义者的观点来看，思维是一种外部动作的属性而不是内部方法的属性，并且由此出发，机器肯定是可以思维

的。图灵的模仿游戏实际也是一种对思维进行行为主义定义的方法。

由行为主义方法去认识思维，控制论的创始者们认为思维的本质是与信息和负反馈联系在一起的。维纳认为，神经网络和自动控制机的相似之点是环绕着非常基本的信息概念而发现的。维纳在《人有人的用处》一书中，把信息规定为我们对外界进行调节并使我们的调节为外界所了解时而与外界交换的内容。维纳认为，交换信息是人的“内在生活”和“社会生活”的本质，是人对外界环境中的种种偶然性进行调节并在该环境中有效地生活着的过程。这实际上是说，思维过程的本质在于信息交换，而大脑就是一个储存和加工信息的机器。

艾什比则用负反馈的观点来探索大脑的本质。他认为大脑同动物体中的所有其它器官一样，它是为了生存的特殊工具。它的性能决定了它的基本结构方式，“它必须具有某些持久不变的‘目标’——它生存的根本条件——它必须在各种各样的环境下都能达到这些目标”^①。但从1940年起，许多机器也可以做到这一点，只要这个系统具有负反馈，它就具有了自寻目标的适应性。因此，艾什比认为：“在这里，重要的是‘自寻目标’的特性不是生命或精神的特性，而是负反馈的特性。任何机器，虽然是无生命的，只要有了负反馈就可以有这种特征。”^②用通俗的话概述艾什比的观点，这就是说，思维的特征是自寻目标，而自寻目标是通过负反馈来实现的，因此，具有负反馈的系统也就具有了思维的特点。

控制论的创始者们正是基于这种对思维和大脑本质的认识提出了“机器思维”这一概念的。

①② 艾什比：《设计一个脑》，载《控制论哲学问题译文集》第一辑，第65—66页。

在以后的讨论中，许多人从不同的角度对思维的行为主义定义以及图灵的模仿游戏进行了批评。

一些苏联和东欧的哲学家和科学家在50年代和60年代，主要是用思维本质的社会性来批评这种对思维的行为主义的定义的。从而也否定了机器思维这一提法，认为这是不严肃和不科学的。

以后，随着人工智能的发展，人们对许多技术问题的讨论日益深入，又有人从这个方面提出了许多对于机器思维的异议。

70年代初，日本的渡边慧在《人工智能的可能性和界限》一文中讲道：“现在美国已经能够用电子计算机进行所谓自然语言的分析了。这边用英语说话而那边用英语回答的程序也做出来了。这种试验是要看看，能不能因为看不出人和电子计算机的差别就得出电子计算机和人的智能相同的结论。这是重大的方法论问题。首先，例如下象棋，是否就是全部人的智能呢？不清楚。进行了一定的对话，只能说明，仅仅进行了这种对话。诚然，这就不能掌握这里的人和电子计算机的区别。但仅此而已，并不能说明电子计算机和人相同。其次，再用抽象一点的语言来说，就是经验科学的归纳试验，还不是逻辑的证明。我们不能忘记这个重要之点。正因为这样，实际上现在的电子计算机连图灵试验也通不过。”^① 渡边慧在这里从哲学的角度说明了不能用经验主义的方法来给思维下定义，从而，任何行为主义的有限试验也无法证实机器能思维。

1974年，美国的里德也同样地指出了智能的操作主义定义的局限性。他认为智能与智能的发展不仅仅是特殊技能或才能的简单的集合体。在人的能力与能力之间以及能力与人的其他特性之间有着复杂的相互关系。因此，用对于不同范围的问题作出反应

① 渡边慧：《人工智能的可能性和界限》，载《外国自然科学哲学摘译》1974年第2期，第30—31页。

的那种操作主义的智能定义是不足以描述智能的过程的。在这种认识的基础上，他提出了人与自动机之间应该在三种不同的水平上进行比较。“第一种水平，有时候叫做模拟，强调共同具有的行为特点。第二种水平是较为严厉和严格的一种水平，要求人同机器之间在反应上没有本质的不同。第三种水平要求导致人与机器中等价反应的过程是等同的。”^①由此他提出了自动机的发展要以生物学为基础。他主张思维是结构和功能的统一，只有脑模型的方向才能最后解决智能模拟问题。

在关于机器思维的争论中，还有这样一种给智能和思维下定义的方法，即把目前机器还不能做到的事情定义为智能，只要机器做到了，就把它排除出智能的范围。例如计算，在古代，肯定被认为是只有人并且是聪明的人才能做到的，但现在计算机在计算方面的能力远远超过人，因此，计算就被排除在人的智力以外。法国的控制论学家科萨就是这种观点^②。他把人的意识活动分为两类：纯粹自动化的和不是自动化的。所谓纯粹自动化就是人脑中所进行的一种机械化的过程，这种活动被机器所实现并不意味着这种机器能思维，而只说明这种活动不是思维。按照这种思路思考问题，现在有人把创造性定义为思维，有人把或然性作为思维的主要特征，等等。

在我国，这方面的讨论也很多，这里只略举一二。西北工业大学的何华灿在其所著的《人工智能导论》讲义中给智能下了一个粗略的定义。设有系统A和它的存在环境B组成一个交互作用的复合系统，如果系统A能在这种交互作用的过程中不断识别环境，并为了一定的目的去影响环境，而且它还能够不断记忆整个

① 里德：《人工智能的评价问题》，载《外国自然科学哲学摘译》1976年第2期，第157页。

② Косса，〈Кцбернетика〉，1958。

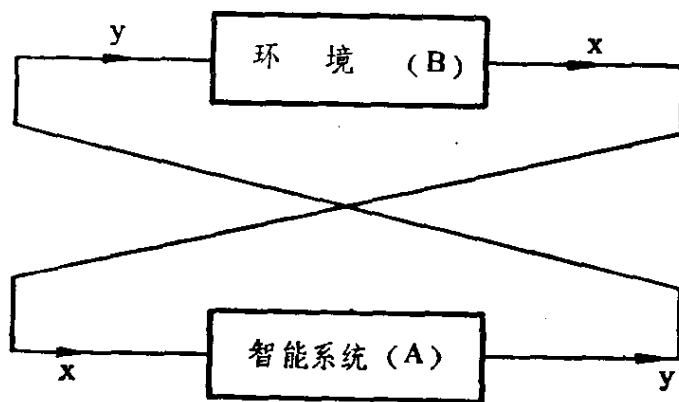


图5.1 智能系统与环境交互作用图

活动中的有用信息（知识），并用它来改变自己对环境的行为特性，以便更好地去达到自己的目的，我们就说系统 A 具有智能。凡具有智能的系统就叫智能系统。在这里知识的获得可以被看成是系统内部状态的改变。也就是说，智能系统在与其环境的交互作用的过程中，不断地改变着自己的内部状态。一般来说，系统的知识积累得越多，其智能就越高。何华灿认为，一个完全的智能系统必须具有以下特性：（1）智能系统是一个信息处理系统，它加工的对象是信息流。它的输入是关于环境的状态 X，输出是系统的行为状态 Y。（2）智能系统不是一个孤立系统，在它之外一定还有一个环境，环境不断给它以激励，它则不断给环境以响应，从而构成了一个交互作用的闭环系统。（3）智能系统内部存在记忆，它记忆的内容包括自己的行为状态和环境的特性状态，这些统称为知识。（4）智能系统具有目的性，并能运用自己已经获得的知识来改变自己的行为特性，去不断接近这个目的。（5）智能系统是一个进化论系统。进化的原始基础是由“遗传基因”所决定的系统结构，它包括感受环境的输入部分和作为效应器的输出部分，以及介于这两部分之间的负责记忆和思维的中枢部分，智能系统的进化相当于中枢部分的结构在变化。何华灿认为，根据上述定义，不仅动物的神经系统是智能系统，

而且生物的遗传系统和人类社会，在一定意义上讲也可以等价为一个智能系统，满足上述条件的机器系统，同样应该被认为是一个智能系统。

有些哲学工作者常把思维分为几个部分，如形式逻辑，辩证思维，遐想，联想和形象思维等，以及意识外的一些活动。他们往往认为现在的机器仅仅模拟了形式逻辑的一部分，而不能说是模拟了思维。

由于人们对思维 and 智能讨论的角度有很大的差异，对思维和本性的认识也有很大的不同，所以，对“机器思维”提法的内涵也有重大的区别。

3. 牵涉到数学问题的一些争论。

这方面的争论可以概略归纳为三个方面，即形式系统问题，算法问题，哥德尔定理问题。这三个方面实际上又是紧密联系在一起。

首先，思维是否是一个形式系统呢？这是与算法理论密切相关的一个问题。冯·诺意曼曾指出：人脑的语言不是数学的语言。语言在很大程度上是历史的事件，语言是多样性的，其中并没有什么绝对的东西。逻辑和数学也同样是历史的、偶然的表达形式。冯·诺意曼在这里指出了思维和语言的不确切性，也就是说人的思维和语言不是一个形式系统。苏联的格鲁什科夫曾运用人类思维和知识的有限与无限这对矛盾论证了把人的思维形式化的可能性和局限性。他认为，可以把科学发展进程中知识数量的增加解释为无限地扩大形式语言系统的过程，在这个过程中，在任何事先规定的时刻内的全部人类知识都是可以被形式化的。但是，这种形式化作法中的任何一种，并不能把整个无限的认识过程都加以形式化。因此，在任何一个固定的形式语言系统的范围内，不仅不能把全部思维完全地加以形式化，甚至其中通常被称作逻辑思维的那一部分也不能完全形式化。还有人从人们对大脑

认识的不完全性来否认智力形式化的可能性，认为如果能精确地模拟每个神经元和神经元之间的联系的可能性存在，我们就得承认智力是一种形式系统。但是必须承认，至少可能有某些存在于大脑中的计算，会在比如说量子力学一级的水平上发生，那么，在原则上神经元之间的某些关联就是无法觉察到的，因为在观察它们时就可能已破坏了它们。

虽然大多数人都否定思维的完全形式化，但在人工智能的讨论中，人们面对的只是一个个有限的形式化系统，因此更明确的问题应该是机器在处理这些形式化系统时有什么样的局限性。这就是算法理论要回答的问题。计算机科学家克努斯（Knuth）认为计算机科学就是研究算法的科学。这个提法尽管不够全面，但无论如何算法的研究是计算机科学的重要方面。数理逻辑也研究算法理论，但它讨论的是算法的一般特征。而克努斯所强调的则是结合计算机的具体条件研究算法。王浩曾指出，有了图灵机以后，仍然存在着理论与实际的关系，有穷经验与无穷可能性的关系这样重要的问题。他指出，虽然图灵机对机器在理论上能干什么或不能干什么的问题提供了精确的回答，但是在不久的将来，人的哪些活动能实际交给机器去做是不清楚的。王浩认为，为了扩充计算机的应用领域，应该研究一种新的数学，它对实际可能性比理论可能性更感兴趣。从现在来看，计算机界也确实越来越重视实际可能性的问题，对这个问题的认识也影响着人们对机器思维问题的认识。10多年前，人们对计算机的能力是相当乐观的。1972年，一个叫做麦克莱恩的英国人搞了一个民意测验，他给英美等国的63个控制论专家发了调查表，调查题目是：您认为再过多少年可以研制成能与成年人智力相等的电子计算机？麦克莱恩于1973年在国际第三次控制论会议上，报告了他的调查结果：5年以内的无；10年以内的1人；20年以内的19人；50年以内的37人。在这次调查以后的10多年中，计算机在精度、通用度和速度

上都有了很大的提高，但人们对计算机能力的认识却比10年前清醒得多。人们认识到有许多事情计算机实际上是办不到的。例如，一台1秒百万次运算速度的计算机计算 2^{60} 次要3.6万年。这就限制和影响了计算机的实际能力。以下围棋为例，一个共有 19×19 格的围棋，每格上的情形有三种可能：黑子、白子、无子。那么一盘围棋就可能有 3^{361} 种布局，从理论上，计算机可以通过逐个比较来寻得最好的布局，但实际上，它几乎无法处理 3^{361} 这个天文数字。

对机器思维讨论影响很大的还有哥德尔不完全性定理。许多反对机器思维的人都以哥德尔定理为论据，认为它必定适用于控制论机器，也就是说，假定有一架机器，它是不矛盾的并且能作出简单的计算，那么就总有一个公式，这个公式不能由机器推出为真。图灵曾用多种机器的制造来克服哥德尔定理带来的困难。以后，又有人反驳图灵的这种说法，认为每架机器都有自己的哥德尔公式，不论我们所造的机器是多么复杂，只要它是一台机器，它就要与一个形式系统相对应，这个形式系统又可以运用哥德尔方法找出一个为此系统所不能证明的公式。图灵当初曾认为，哥德尔定理不能证明机器没有智能，因为哥德尔定理对计算机的限制并不大于对我们自身的限制。但以后也有人反驳这种观点，认为哥德尔定理只能适用于演绎系统，但人类却不限于只作演绎推理；哥德尔定理只适用于形式系统，而人类的发明才能并不受先验的限制。有人认为这种说法本身就是唯心的和抽象的，因为它假定了人能对任何问题，其中包括非形式地提出的问题，作出正确回答，人的大脑能进行无限复杂的形式计算。这种假定把人想象成了充满无限真理的一个无限复杂的机体。在这个问题上，据王浩在《从数学到哲学》一书的第十章中披露的材料，哥德尔自己认为，不能由他在1931年证明的结果得出机器不如人脑的结论。这是意味深长的。

总之，以上关于形式化理论、算法理论、哥德尔定理对机器的限制，是人们普遍承认的。争论的焦点在于，这些限制是不是也同样适用于人。于是，问题又回到了对人的思维过程的认识上。这些争论至今还没有定论，很大程度上取决于人们对自己的思维过程的认识还不足以说明这个问题。

4. 这场争论中牵涉到的几对哲学范畴。

在机器思维的争论中，由于有许多人用机器是离散的，大脑是连续的；机器是简单的，大脑是复杂的；机器是必然的，思维是或然的；机器是有限的，思维是无限的，等等，来说明机器不能思维，因此引起了人们去深入讨论连续与离散、有限与无限、简单与复杂，必然与偶然这些范畴。这里我们就不展开讨论这些问题了。

5. 关于人一机关系。

控制论的创始者们一开始就很关注这一问题。维纳说：“我们不能要求机器同时使我们兼得两种不同的东西：一方面我们想使它‘理智’，而另一方面却想使它‘顺从’。这两种要求是彼此对立的。完全实现其中的一个，就意味着达不到另一个。”^①因此维纳认为，人使用机器的全部问题在于，“当我们使用有理智的机器的时候，我们自己应该在我们利用这些机器之前，表现出更大的理智和才能”^②。他认为归根结底，人确实比机器更聪明。

“我们有最低级的机器，它们按照给定的程序动作。我们有比较高级的机器，他们能通过学习改变自己的程序。我们还有能学会学习的机器等等。最低级的机器的动作，比起活人来是比较可靠也比较迅速的。然而对比较高级的机器讲来，人就有了优越性。人更灵活并且有运用尚未很好确定下来的思想和‘不清晰’思想的

①② 苏联《哲学问题》编辑部：《N·维纳在我们杂志编辑部》，载《控制论哲学问题译文集》第一辑，第24页。

能力。而在某个地方，在某个十字路口上，这一优越性就会起着决定性的作用。当然，这一点并不是严格固定的，它将随着机器的发展水平而发生变化。不过我认为，这一点永远是会存在的。”^①

艾什比认为，建造一架能成功地应付比目前人脑所能处理的更复杂的情况的机器，将会改变我们目前的许多困难和混乱。在遥远的将来，这样的机器不仅可以用来迅速回答难题，并且可以探索目前人的智力所不能及的复杂领域。但艾什比也指出了这类机器对人类的可能威胁。

格鲁什科夫认为机器能比自己的制造者更聪明，但思维和认识过程中一切最重要的方面始终是人的领地。在格鲁什科夫看来，这一结论的正确性是由历史决定的。人类智慧的伟大之处在于它能找到克服自然给他的限制的方法。人类的智力和体力不仅是由人们的肌肉和大脑的总数决定的，而且是由它所创造的物质和精神的價值决定的，其中自然也包括控制机器。因此他的结论是：

“在处理信息方面，控制论不仅能够，而且必须超过人；但是在社会历史方面，这些机器现在和将来都只能是人的助手和工具。”^②

目前，在讨论人一机关系时，人们更常用人一机系统的观点来认识这一问题。认为在大多数场合下，自动控制系统都是由两个子系统组成的复杂系统，这两个子系统即是人和机器。虽然这两个子系统之间能列举一系列类似之处，但是它们却有各自的特点。我们的任务不在于排除哪一个或代替哪一个，而在于把它们

① 苏联《哲学问题》编辑部：《N·维纳在我们杂志编辑部》，载《控制论哲学问题译文集》第一辑，第32页。

② 格鲁什科夫：《思维和控制论》，载《外国哲学资料译文集》第四集，第203页。

结合成为一个统一的机能整体，更确切地估计它们的弱点和优点，把两个子系统的工作最佳地结合起来。

关于人一机关系，一般认为机器可以在某些方面超过人，但归根结底是人占优势。

6. 争论中总的三种倾向。

关于机器能否思维，是控制论中争论得最激烈的一个问题，涉及到许多方面，但从基本倾向来说，大体上可以分为三种。一种是抱积极肯定的态度，这种态度可以说是从图灵开始或以图灵为代表的。他们认为，在不远的将来，终究可以造出与人的智能相当的智能机器。我们前面讲过的那次调查，就反映了这种倾向。第二种是悲观否定或不可知论的态度，认为计算机并不能做许多人的智能所做的事情，他们看到了西方少数人对未来的预测是靠不住的，于是起来批判以图灵为首的那些人的观点。比较有代表性的是加利福尼亚大学伯克利分院的特莱弗斯的观点。1971年，他写了一本讨论人工智能理论问题的专著，书名为《人工理性批判》，作者力图象康德的《纯粹理性批判》中论述人的理性的局限性一样，系统地论述一下什么是计算机做不了的。但他在这本书中把整个人工智能都否定了，认为这是一门伪科学。第三种是对这个问题持慎重态度，实际上是介乎前两种倾向之间的一种中间立场，计算机界的人大多持这种态度，认为计算机在几十年内可以做许多人的智能做的事，但归根结底不能代替人。

从目前的情况来看，这三种倾向的论点或论据都在不断地变化发展，但基本倾向没有变，争论仍在继续，没有得到完满的解决。不过，至少尚无迹象表明，能在几十年内造出与人的智力相当的机器。由此看来，第一种观点未免过于乐观；而第二种否定的观点则失之武断和绝对化。

7. 我们的一些看法。

首先，我们认为“机器思维”这一提法是有一定道理的，因

为机器确实代替了人的一部分脑力劳动，或者说模拟了人的一部分思维。机器思维不是用某个机器代替某个人的思维，而是要用某种机器代替人的思维方面的某种能力。因为人工智能的研究在某个领域中取得了一些成果，就声明这个领域不算智能，这是一种神秘主义的方法，实际是说认识了的就不是智能，反过来也就是说智能是不可认识的。

其次，关于思维的本性，辩证唯物主义也提出了自己的观点。辩证唯物主义所说的思维主体，不仅是指一个有血、有肉、有大脑的人，而且是指一个拥有各种生产工具，同他人处在一定社会关系中的人。从总体上说，思维的主体即实践的主体，是指社会发展在某一特定阶段的人类。正如恩格斯所说：“终有一天我们可以用实验的方法把‘思维’归结为脑子中的分子的化学运动，但是难道这样一来就把思维的本质包括无遗了吗？”^①就是说，思维是一个多层次的、错综复杂的运动过程。过去对思维的理解常常是以心理学、高级神经生理学、语言学的研究成果为主要依据。从某种意义上说，控制论也可以作为一个研究思维的基础学科。控制论把思维看作一个信息流通、交换、加工的过程，不仅有助于人们理解思维的物理、化学、生物的本质，而且有助于人们理解思维的社会本质。

再次，机器思维的提出正反映了现代思维的特点。思维越发展，它对自身规律的认识就越深刻，并且它要努力运用对自己认识的知识来发展自身。所谓自己发展自己，其中的任务之一，就是用形式化的方法和手段来解决思维所面临的各种任务，也就是研究机器解决问题的各种算法。机器思维的提出是与思维发展的这种相对独立性密切相关的。当思维发展到一定阶段，它把自己的一部分工作交给机器来完成，这可以说是一种必然的趋势。

① 《马克思恩格斯全集》第20卷，第591页。

当然，机器思维只是人的思维的一定程度的延长和补充，它不是一种独立的思维。

最后，我们想提一下机器思维这场讨论中的一个值得注意的问题。1971年，在美国组织了一次关于“人工智能的可能性和局限性”讨论会。在讨论会呈交全国科学基金会的提议中曾这样讲到：“这个问题不仅在实用方面是重要的，在哲学上也具有挑战意义。尽管这个问题的意义深远，但实际上它从未被作为重要的课题，进行严肃的共同研究或讨论，而只是经常在不同的场合或多或少地被许多人触及过。这个问题的特点是，哲学家和计算机科学家们都对这同一个问题进行过讨论，但在这两组人员之间却没有重大的相互交往。”^①这个概括是相当确切和深刻的。在这场讨论中，正是由于没有共同的语言，所以有不少哲学家在不很理解这一科学进展的实际问题的基础上，发表了不少思辨的和表面的议论，但也有一些科学家缺乏在正确哲学思想的指导下的对概念的全面、深刻的分析。也正是由于没有共同的语言，所以在不同的人那里，问题有着不同的内涵。问题的不明确给问题的深入讨论带来了很大的困难。因此，哲学家和科学家必须在这个领域中加强交流。

第四节 控制论与社会

控制论是否能够应用于社会？如何应用？有何条件与限制？应用社会后会有什么结果？这是控制论产生以来一直有争论的一些重大问题。有些问题现在已经得到或基本得到解决，有些则尚待进一步讨论并从实践中得出结论。

^① 《外国自然科学哲学摘译》1976年第2期，第135—136页。

控制论应用于社会的可能性

本书前面已经涉及过这个问题，这里仅将有关的讨论简述如下：

1948年，维纳在《控制论》一书中，曾提醒人们不要对自然科学的方法运用于社会领域过于乐观，他认为，社会科学同自然科学毕竟是有区别的。首先，在社会科学中，观察者和被观察现象之间的耦合过于密切，很难分离；第二，社会科学所研究的对象不仅仅是错综复杂的，而且是变化无常的；第三，社会科学的研究是统计性的，其可信的程度只能达到头几位数字。因此，虽然从总体上说，维纳认为控制论可以而且应该运用于社会领域中，但他同时也十分强调要持慎重的态度。

在50—60年代，围绕维纳的这些观点曾展开过激烈的争论。例如，日本的芝田进午在60年代初就批评了维纳的观点。他认为，维纳强调在社会科学领域中观察者对于对象所施加的影响，以及统计资料上存在的困难，这些论据不过是一种误解。他正确地指出，问题的症结在于维纳对社会规律的客观性缺乏认识，由此陷入了不可知论^①。

当然，维纳的观点并不是一成不变的，他在以后的一系列著作中是非常重视控制论和信息论在社会领域中的应用的，并做了许多论述与分析。并且，这一场争论就西方来说已基本解决，控制论已经在社会领域里发挥了应有的作用。

就苏联的情况来说，50年代初，在反控制论的思潮影响下，反对把控制论应用于社会科学也就很自然了。他们认为在社会领域里运用控制论就是混淆了机械的、生物的、社会的规律性，就是否认了社会发展的质的特殊性。50年代中叶以后，苏联许多学

^① 参看芝田进午：《控制论和社会科学的将来》，载《外国学术资料》1963年12月。

者开始客观地、科学地重新分析控制论的意义和作用，逐步肯定并在实践中将控制论应用到了社会领域。

控制论的社会观

如何运用控制论来看待与分析社会呢？这是维纳等人所关心的一个问题。在《控制论》一书中，尤其是在以后的《人有人的用处》及其晚期的《上帝和高兰合股公司——关于控制论冲击宗教而产生的某些问题的评论》等著作中，维纳都用了相当的篇幅来讨论这个问题。艾什比等人也有过一些议论。

维纳把社会看做一个通讯和控制的系统。他认为，信息和通讯作为一种组织化机制，它不仅存在于每个个体之中，而且是任何团体组织赖以存在的纽带。他以蜂群为例来说明这个问题。蜂群是一致行动的，这种一致行动中有变化、适应性和组织性。维纳认为，这里的全部秘密就在于蜂群的成员之间有相互的通讯。他由此推而广之，认为由每个个体人所组成的社会团体也是依赖于人们之间的相互通讯而生存的。并且，和其它任何动物团体的通讯相比较，社会团体中的通讯更加复杂和丰富多彩，它包括了全部复杂的语言和文献以及许多其它东西。因此，他认为“只能通过消息的研究和社会通讯设备的研究来理解社会”^①。

维纳进一步分析了人类社会的通讯特征。在维纳看来，通讯行为具有两种模式，一种是定型的，一种是学习的。定型的通讯方式大都存在于动物团体之中，它是没有反馈机制的、依靠本能而进行的通讯行为。学习是比这种定型通讯行为高级得多的一种通讯方式，它具有反馈机制，能在过去经验的基础上来改变自己的行为模式，从而达到特定的目的。社会就是在这种比较高级的通讯方式下联合起来的，所以，社会反馈对于社会控制就是一个至关重要的问题。维纳认为，在社会实践中，最简单的反馈是检

^① 维纳：《人有人的用处》，商务印书馆1978年版，第8页。

验任务的成功或失败，同时还存在着许多别的形式的、具有比较复杂性质的反馈。例如，策略性反馈就是一种较高级的反馈。人们常常需要知道指导行为的总政策或策略是正确的还是错误的，是成功的还是失败的，并且根据所得信息来进一步修改政策、策略，这就是策略性反馈的任务，这种反馈应是社会控制的主要表现形式。不论是政府、大学、工厂的行政管理人员，都应该自觉地掌握这种方法，形成一种所谓的“双向通讯流”，即从上到下又从下到上的通讯流。这也就是说，作为一个管理人员的任务，它不仅仅要把自己的政策方针贯彻下去，更重要的是要努力收回政策方针贯彻执行的情况，并根据此情况进一步修改政策方针，达到控制某一系统的目的。

基于上述理论上的分析，维纳极力主张建立民主、自由的社会，这种社会要求个人之间和阶级之间的通讯障碍不要太大。他认为在那些等级制度森严的社会中，门第和社会地位的严格限制是人与人之间的通讯障碍，这影响和延缓着社会历史的发展。因此，维纳指出：“内部通讯通路的完整性乃是社会福利不可或缺的条件。”^①

维纳的上述观点作为研究社会的一种方法或一个角度有可取之处，这些观点对人们科学地管理一个国家，建立健全政体形式有一定的启发意义。

维纳等人在上述基本思想指导下，进而分析了一些具有一般性的社会现象。

1.控制与语言。人类要有通讯交往，就必须使用语言。人的语言系统可以看作是一个通讯网络，并可从不同级别进行研究。维纳认为这个网络大致可分为三级：第一级是语言的语音方面。第二级是语言的语义方面。这是讲语言的意义问题。当我们把一

① 维纳：《人有人的用处》，商务印书馆1978年版，第106页。

种语言翻译成另一种语言时，意义的问题就表现得很突出。因为不同的语言之间，词的意义并不完全对应，这就限制了由一种语言到另一种语言的信息流动。第三级是语言的行为方面。它是指人们有意识或无意识地把个体经验翻译成的外部可见动作。这些动作包括两部分：一是讲话，一是书面语言。用控制论的观点来看，语言同其它通讯机构一样，也服从于熵不断增加和信息在传输中会丧失的规律。因此，控制论就要对以语言形式出现的语言和行为语言进行统计研究，以便对它们所含的信息作出合理的度量，从而加以控制。

2.控制与法律。维纳认为，人类社会通讯的基本特点不仅在于需要语言，法律也是人类社会通讯的一种形式，因此，他十分重视这一领域。他曾指出：“法律可以定义作对于通讯和通讯形式之一即语言的道德控制……法律是以所谓正义得以伸张、争端得以避免或至少得以仲裁这样的方式来调节各个人行为之间的‘耦合’过程的。”^①这也就是说，法律问题就是通讯问题、控制问题，它调节各个个人行为之间的“耦合”过程，对一些危险情况进行有秩序的控制。维纳认为，法律在其发挥社会作用时，分为理论和实践两类问题。所谓理论问题，是关于法律的一般目的即关于权利、义务、正义等概念问题，要使社会的每一成员懂得什么是自己的权利和义务，以合理的态度来对待、调节人与人之间的关系。所谓实践问题，是指使这些理论发生效用的方法、手段。维纳认为，这正是控制论大有作为的领域，因为法制的全部特性就是矛盾和冲突，它是一种至少有三者参加的谈话。例如，在民事案件中，就有原告、被告和法律机构三方面参加，这也可以叫做一种博弈，可以用博弈理论来研究。应该说，维纳的这些观点对建立法律控制论有一定的积极作用。

^① 维纳：《人有人的用处》，商务印书馆1978年版，第83页。

社会的稳定性

艾什比认为，社会象生物系统一样具有稳定性。这里的所谓稳定性，就是指系统自身内部可以自我调节、自我控制。艾什比希望能够科学地组织社会，使社会在某些方面能更象大脑，也就是说，人们自己可以更加自由、更加准确地控制社会。

根据资产阶级学者的传统观点，资本主义的自由竞争就是一种内稳定过程。在一个自由市场上，交易者出于个人的私利，都尽可能地设法贱买贵卖，最终将使价格趋于稳定。维纳用控制论的观点驳斥了这种理论。他认为，竞争就象一场赌博，它严格服从博弈理论，因此，竞争的结果并不是达到稳定性。这是因为市场上的赌博是由完全理智的、完全无情的赌手来进行的，各个参加者都尔虞我诈、互相残杀，使博弈的结局非常难于趋向稳定。因此，维纳认为，资本主义社会是缺乏任何内稳定性的。它面临着繁荣和衰落的商业周期，并不断陷入到战争中去。他认为要达到社会内稳定性的重要因素是通讯机构的完善化。可是在以买卖为基础的社会里，通讯工具的内在重要作用逐渐减弱，而变成了赚钱的工具。

控制论与高度自动化技术带来的社会后果

这个问题也属于控制与社会这个方面，关于这个问题争论很多，我们在这里略作介绍。维纳讲过：“新的工业革命是一把双刃刀，它可以用来为人类造福……也可以毁灭人类……”^①但就50年代的情况看，维纳的基本思想倾向是带有忧虑和悲观色彩的。这与维纳受存在主义影响是有关的，并且也确实反映了当时的基本思潮。但后来的实践证明，控制论与高度自动化将会推动社会的发展，并将造福于人类。

当时人们担忧和恐惧的核心问题是将来人会被自己创造的机

^① 维纳：《人有人的用处》，商务印书馆1978年版，第132页。

器所奴役，人成为机器的奴隶。从现在的发展来看，这一问题已比较明朗化了。人们越来越明确地感到，人机是可以共生的，在这种共生中，人类是占优势的。并且，高度自动化可以成为扬弃异化劳动的有力杠杆。它们有可能使人摆脱一切机械性的、非创造性的劳动，有可能引起劳动条件和劳动性质的根本变化，从而有可能克服脑力劳动与体力劳动的差别。当然，所有这些都要靠社会关系的变革来保证其实现。关于人机关系，我们在上一节已有一些说明，这里就不做更多的论述了。

关于控制论与高度自动化所引起的社会后果问题是一个很复杂的问题，在以后的信息论、系统论部分我们都要提到，这里就从简了。

第五节 控制论与马克思主义哲学

控制论的产生和发展对马克思主义哲学发生了很大的影响。一方面，这是由于马克思主义哲学作为对自然、社会和思维的知识的一般规律的概括和总结，必须随着各门具体科学的发展而发展；另一方面，则是由于控制论虽然不是研究一般规律的科学，但它涉及到许多领域，是研究任意系统关于控制与信息的共同规律的科学，它比起其它具体科学来说，离哲学更近一些，因而它对哲学的影响也就更大一些。

控制论的研究更进一步论证了马克思主义哲学的基本原理，同时也向马克思主义哲学提出了一些新问题，使马克思主义哲学在研究这些新问题的过程中得到了进一步的发展。现仅就其中的某些问题加以论述。

控制论与世界的物质统一性

恩格斯在《反杜林论》中指出：“世界的真正的统一性是在

于它的物质性，而这种物质性不是魔术师的三两句话所能证明的，而是由哲学和自然科学的长期的和持续的发展来证明的。”^① 控制论的产生和进展为这一基本原理提供了新的论证，并丰富了这一原理的内容。

苏联的 A. И. 别尔格等人，在1962年出版的《哲学百科全书》第二卷中比较具体地论述了这个问题。他指出，相似理论是控制论中所运用的模拟实验法和类比法的理论基础。这种相似理论是以客观世界中不同系统间所具有的某种相似性为根据的。这种相似性表现了世界的物质统一性。

在控制论产生以前，虽然在原则上认识到了无机界与有机界之间的物质统一性，但对其间的许多重大差别在理解上还存在分歧。控制论的重大贡献之一就在于揭示了无机界与有机界、机器与生命之间的一定的相似性，使得物理系统与生命系统之间存在着某种对立，不再成为绝对的对立。尤其是近年来关于耗散结构理论与协同学的研究进展，使得热力学第二定律与生物进化系统之间的矛盾（有关内容见本书第三篇）也日益得到一种统一的理解。控制论所提出的智能模拟任务以及人工智能的研究进展，使得物理现象与心理现象之间的对立也不再是绝对的了。人们对那些本来是作为高度组织起来的物质所具有的某些智能特性，也能够运用技术装置进行一定程度的模拟，因而说明心理现象也并不是神秘的，而是与一定的物质过程相联系的。

这样，控制论不仅在科学技术史上使得生物科学与技术科学相互沟通起来，使得技术科学与心理科学也相互沟通起来，而且在哲学史上比以前关于物理的与生理的、物理的与心理的提法前进了一步，第一次揭示出心理的、生理的与物理的之间的一定相似性或统一性，为世界的物质统一性原理提供了一项新的深刻论

① 恩格斯：《反杜林论》，人民出版社1970年版，第41页。

证。

此外，控制论与信息论在科学技术史上第一次明确地提出了信息概念。在50至60年代，还往往只将信息与控制过程联系在一起，但后来则一般公认信息具有普遍性。如果说，关于世界，在以前只有质量与能量这两个基本概念的话，那么现在则公认有质量、能量与信息这三个基本的科学概念。信息的普遍性与质量、能量的普遍性一样，加深了我们对世界的物质统一性的理解。

控制论与辩证发展观

维纳在《控制论》一书的开头部分就提出了柏格森时间的不可逆性问题，并把这种不可逆性与牛顿力学中时间的可逆性作了对比。这在实质上涉及进化观与发展观的问题。柏格森是一位唯心主义的哲学家，他当然是站在唯心主义立场上来提出进化观的，但他强调进化过程中时间的不可逆性确实是抓住了进化的一个重要特征。在这一点上，控制论、信息论与热力学的进展提供了十分重要的论据，这就是所谓热力学、信息论与生命进化问题。这个问题涉及范围很广，我们在第三篇中有专门论述。这一问题不仅使辩证唯物主义的发展观更加具体化，而且从中还可以提出很多有待于进一步探讨的问题。

维纳从一开始就对这个问题很重视。他说：“但当整个宇宙（如果真的有整个宇宙的话）趋于衰退时，其中就有一些局部区域，其发展方向看来是和整个宇宙的发展方向相反，同时它们内部的组织程度有着暂时的和有限的增加趋势。生命就在这些局部区域的几个地方找到了它的寄居地。控制论这门新兴科学就是以这个观点为核心而开始其发展的。”^①这段话的某些提法是值得商榷的，但它对世界的进化与发展过程则是加以肯定的。这一观点的论据在于热力学熵的减少或负熵的增加。由于热力学与信

① 维纳：《人有人的用处》，商务印书馆1978年版，第6页。

息论的一定联系，使得信息在系统中显然具有方向性的指导作用。在这个意义上，辩证发展观的方向性，即从简单到复杂、从低级到高级的过程也是与信息、控制的过程分不开的。可见控制论与信息论对此提供了一种科学的解释与论证。

此外，还有人用正、负反馈的概念与质变、量变的过程加以对比的研究。尤其是克劳斯，他用控制论对唯物辩证法作了比较系统的解释。在他看来， $f(x) = e^{-x} \sin x$ ， $f(x) = e^x \sin x$ 和 $f(x) = \sin x$ 分别表示辩证矛盾变弱、加骤与稳定这三种情况，据此，他称控制论为“实验辩证法”。他将控制论的很多范畴与辩证法的范畴对应起来，并用控制论的观点解释对立统一规律^①。他的这些观点引起过不同的评价。后来还有人提出了哲学的数量化与实验化的研究问题。这是当前有争议的一个问题。

除了上述用控制论解释唯物辩证法的倾向以外，还有用唯物辩证法来探讨控制论问题的倾向。这在我国与苏联、东欧国家中研究得相当热烈。这两方面有关的论著较多，这里难以详加评介。在此，只举一个西方国家中的例子。法国的居尧谟（J. Guillemand）曾发表过《控制论与辩证唯物主义》的专著，其中指出控制系统的运动本身就是一种矛盾的运动过程，因为负反馈是具有对抗性的，自动调节的机制实质上是对外在环境对于系统所施加的影响（干扰）以适当的反抗，而且是一种积极的反抗，正是这种内在矛盾推动着控制过程的实现。^②

控制论与马克思主义认识论

控制论、信息论提出的一些基本概念与方法，如信息、反

① 参看克劳斯：《从哲学看控制论》，中国社会科学出版社1981年版。

② 参看居尧谟：《控制论与辩证唯物主义》，载〔法〕《思想》1946年10月号。

馈、黑箱、功能模拟等对于马克思主义认识论的研究是有深远意义的。信息论与认识论的关系涉及到信息与反映、意识之间的关系，这是当前认识论、心理学中的一个重大问题。本书将在第二篇的信息论的哲学问题中加以概述。关于控制论方法的认识论意义则在下节中论述。在此，只以克劳斯的观点作为代表加以简略的介绍。这是因为他着重运用反馈概念来探讨马克思主义的认识论问题，并在《从哲学看控制论》、《控制论和认识论》等论著中提出了比较系统的观点。

克劳斯用信息反馈的观点对哲学史上的认识论派别作了评议。他认为，在“静观的唯物主义”即机械唯物主义那里，认识主体只有从环境接受信息的过程，而没有反作用于环境的反馈实践过程，因此不能验证反映的意识的环境模型在事实上是否与环境相符合。在费希特的主观唯心主义那里，则只有认识主体通过思维创造环境的行动过程，而没有从环境中接受信息的反映过程，因此不能再直接证实有关的信息是起源于环境的。同时，还可以应用控制论去克服康德对人的认识能力及正确性所提出的疑难。事实上是因为出现了干扰，才使信息失真，以致不能把握“物自体”的。康德没有认识到人的认识过程具有改造加工的性质，这往往是通过反馈来达到目的的，也只有通过反馈才能使认识逐步达到主客观相一致。反馈与能动性是相关的。总之，在他看来，马克思主义以前的认识论没有认识到认识过程中反馈与信息概念所起的作用，因而具有片面性。

马克思主义认识论把实践的观点和辩证法引入了认识论，克服了传统认识论的片面性。它指出人的认识过程是一个能动的反映过程，如果用控制论的语言来描述的话，就是一个信息反馈的过程。

克劳斯曾经把它表述为一个线路图（见下页）：

这个线路意味着我们从环境中得到信息，然后这些信息为感

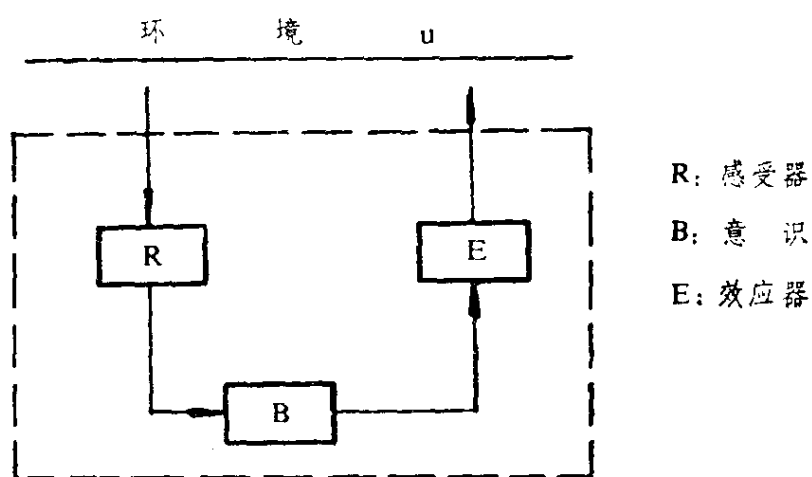


图5.2 克劳斯的“古典马克思主义的认识论”框图

受器R所接受，传递给大脑，在大脑中得到加工而成为意识，与业已存储的信息结合起来，从而构成效应器E的活动的基矗。而这种活动为意识所控制，又反作用于环境U，作用于环境U后产生一定的结果，这个结果又反馈给感觉器R，使人能检查自己的行为是否达到了目的，如果有偏差，可以根据反馈信号来纠正。所以，应该说辩证唯物主义的认识论是唯物主义认识论的崭新阶段，是正确的、科学的认识论。但这并不是说马克思主义的认识论就完全解决了人的认识过程的所有问题。在克劳斯看来，马克思主义的认识论虽然再现了认识过程的一些重要环节，但它还是过于简化的，它只包含了对环境影响的有意识、有计划的反映领域、而不包含受感受、情绪等等影响的思维领域。他把这种具有他所说的不足之处的辩证唯物主义的认识论称之为“古典马克思主义认识论”，进一步，他试图用控制论来补充辩证唯物主义认识论，提出了“现代马克思主义认识论”，其整个认识调节路线如下：

克劳斯把环境称为所知系统，把认识主体称为能知系统，这个调节线路意味着，一方面，所知系统发放的信号，经过编码和解码传递给能知主体形成概念、判断和推理等，使所知系统反映到能知系统里，在这一过程中，人脑并不是消极地接受信息，而

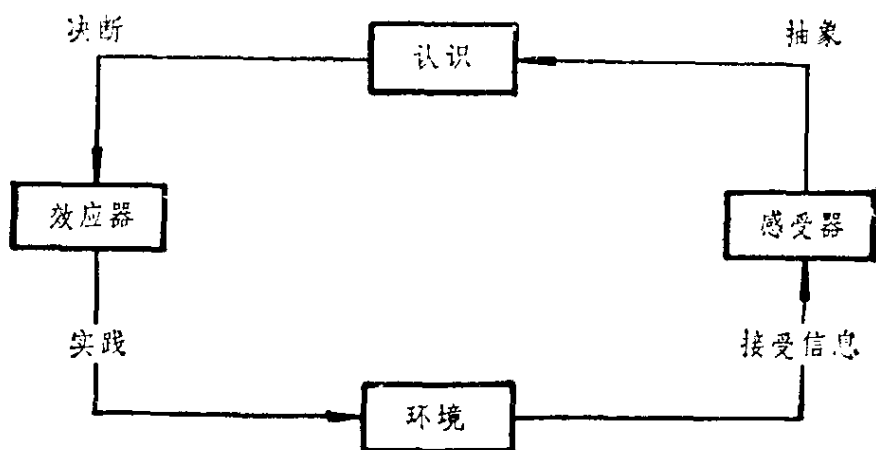


图5.3 克劳斯的“现代马克思主义的认识论”框图

是以人自己的反映方式来反映所知系统，人在解码与编码过程中必然要受到人的主观上的各种影响，信息在某种程度上的失真不可避免。另一方面，能知系统拥有一种解码器，可以把被加工过的信息又变为客观实在的状态，这就是实践，即改变环境的

活动。在这个认识线路中，环境表现为达到一定目标的受调区间，能知的主体是调节器，它可以是单个的人，也可以是社会集团等等，而实践则是特定系统效应器对其环境的特定关系。

当然，对于克劳斯的这些观点是存在着不同看法的。在控制论与认识论这个专题上也是有多种观点的，在此从略。

控制论与辩证唯物主义的哲学范畴

控制论所涉及的哲学范畴首先是因果与目的的问题。这在科学史与哲学史上是一个争论不休的古老问题。一般来说，因在时间上总是前于果，而对于目的来说，结果却是在时间上预先加以设定了的，在这个意义上，果倒在因之前了。所以，在一些哲学家看来，因果与目的是格格不入的。尤其是把因果只看作是机械的决定论观点而与活力论的、唯心论的目的论观点对立起来时，就更为明显了。不少科学家与哲学家长期以来就这个问题进行过

争论。辩证唯物主义对这个问题作出了自己的解释，而控制论则从科学技术上具体地排除了这种对立。如前所述，控制论是用因果链的概念与方法，即把因果看作一组接一组的链条式的联系，而且上一层次的果能够转化为下一层次的因而不断循环往复，直至达到目的为止。这种由上一层次的果转化为下一层次的因的过程就是反馈的过程。经过一次一次地这类因果的转化或反馈的过程，目的就能实现。因此，因果与目的不是对立的，而是在一定条件下有着内在联系的。这样，控制论就对目的性提供了一种唯物主义的解释，这与达尔文用自然选择来解释生物进化的过程是相似的。这在哲学上和科学技术上都具有重大的理论意义和实际意义。

控制论所涉及的另一组范畴是必然性与偶然性。维纳在其《控制论》一书中的开头部分，强调了吉布斯等人将统计规律引入物理学研究的重大意义，并指出这对控制论与信息论来说也是很必要的。这是因为控制过程是一个动态过程，在这个过程中经常要遇到不确定因素的影响，对于控制过程来说，要考虑的主要是不确定的因素而不是确定性的因素。控制系统要达到一定的目的，其实就是从不确定性的因素中探索出其中的确定性因素。用哲学的语言来说，就是从偶然性中找出必然性。

长期以来，尤其是机械论的牛顿力学占统治地位以来，在科学上与哲学上都是将必然性放在主要地位的，似乎科学只与必然性相联系。这是不完全符合科学事实的。统计规律在近代科学中也日益占据重要的地位。现代科学的发展，特别是耗散结构、协同学、超循环等有组织理论的进展更日益显示出偶然性的意义。控制论与信息论不仅在科学上再一次强调了偶然性的地位，而且在哲学上对于辩证地理解偶然性与必然性的转化也提供了强有力的论证。

在当时的条件下，维纳与申农等人对于控制论与信息论中的

不确定性因素只能提供一种统计的概率模型。这就是说，只能用随机性来处理这类不确定的、偶然的因素。从那以后，随着科学技术的发展，只用随机性来处理复杂的不确定性因素显然是不够了。事实上，现代的控制理论与信息科学都在这方面取得了新的进展。在这个意义上，可以理解阿比布（M.A.Arbib）认为统计力学的方法作为控制论的经典核心部分是过时了的观点^①。但是，就偶然性与必然性的辩证关系来说并没有过时，而是更加加深了有关的认识。因此，从一定意义上可以说，控制论和信息论从科学上有力地论证了必然性与偶然性的辩证关系，并强调了偶然性在科学认识中的重要意义。

除了因果与目的、偶然与必然这两对哲学范畴以外，与控制论有关的哲学范畴还有结构与功能、简单与复杂。因为这两对范畴还涉及到系统科学、人工智能等问题，所以只能在相关的部分加以论述，请读者参看有关章节。

控制论与历史唯物主义

关于控制论与社会的问题已在上节中作过论述。在此必须指出，从总体上说维纳的社会历史观是与历史唯物主义大相径庭的。历史唯物主义的基本观点是社会存在决定社会意识，社会的发展是由社会生产方式所决定的。但是维纳却夸大了控制与信息的作用，在运用有关的概念去解释社会生活时，他认为“社会通讯是社会这个建筑物得以粘合在一起的混凝土”^②，进一步在实质上得出了信息决定社会发展的结论。当然，就社会历史的发展，特别是现代社会的发展来看，信息无疑起着愈来愈重要的作

① 参看阿比布：《二十五年来控制论——对系统理论和大脑理论的个人见解》，载《国外自然科学资料（地震、气候、控制论）》，上海科技出版社1970年版。

② 维纳：《人有人的用处》，商务印书馆1978年版，第17页。

用，现代社会甚至被称为信息社会。但是，任何一个社会的通讯水平归根到底是由该社会的社会生产水平所决定的。维纳的这种观点很早就被称为是“唯控制论”、“唯信息论”的一种表现。从这样一种观点出发，维纳当然不可能对人的社会性有正确的认识。

第六节 控制论的方法论问题

从前面一些章节的论述中，我们可以看到，控制论不但比以往一些学科更多地提出了一系列新的科学方法，而且它深入细致地讨论了这些方法本身在认识世界中的优越性和局限性。因此我们说控制论本身具有一定的哲学方法论的特征。

哲学方法论要讨论科学的对象、理论和方法的关系。克劳斯曾专门提及过这个问题，但他没有展开论述。他认为，方法与理论归根到底都产生于科学的对象。理论确定实际情况是什么，方法则是要说明人的认识活动或实际活动是如何根据实际情况进行的。从表面上看，方法似乎是建立在理论基础上的。但科学发展的事实并非如此，特别在一门新科学的开创时期，方法的形成决不需要任何成熟的理论。克劳斯用控制论的创立说明了这一点。在控制论中，我们尚未完全认识事物的结构和精确的行为方式时，就已经拥有把握这种事物的方法了，这就是观察输入与输出关系的黑箱方法。而理论往往是在很晚的时候才告诉我们事实的所以然。因此，从控制论的观点来看，理论在某种程度上就是对输入和输出关系的解释。

克劳斯在这里论述的关于理论和方法的关系是值得注意的。他的看法表明，任何理论都具有当初探讨它的方法的特征，理论往往是方法的自然结果。但关于方法与对象的关系他基本没有

讲，其实在这方面，控制论也给人们以很重要的启示。控制论产生于方法论的讨论，正是在类比方法的基础上它逐步发现了自己的研究对象。这种研究对象是客观存在的，但它们成为一门科学的研究对象，却必须经过一定方法的提炼和抽象，才表现为一种理论框架，成为人们思维和研究的直接对象。科学越发展，这种科学认识的特征就越明显，因此对方法论的讨论也就越重要。

其次，哲学方法论也讨论关于哲学方法、控制论方法与具体科学方法之间的关系。关于这个问题，在科学界和哲学界主要有这样两种观点：一是认为控制论是一种新哲学，控制论方法就是哲学方法；第二种观点认为控制论方法应属于一种共同性学科的一般科学方法，它介乎于哲学和具体科学方法之间。这后一种观点已被越来越多的人所接受。这种看法基于这样一个事实，就是承认控制论的研究对象不是任何个别的、单一的现象和事物，而是一类现象或事物，由此就决定了它的科学方法比其它任何具体的科学方法具有较大的普遍性。但它又不像哲学方法那样抽象地对待世界，而是较为具体地，特别是精确地、定量地对待世界。它是一种“胶合剂”，把哲学方法与具体科学方法牢牢地粘在一起，它是一种“转换语言”，使哲学方法具体化到各部门的科学方法之中，又使各部门的科学方法统帅于哲学方法之下。

与此相关，控制论方法的一些主要特征可概述如下：

首先，控制论方法体现了认识与实践的统一，理论与技术的统一。例如，功能模拟所建立的模型不仅是认识的手段，而且本身是认识的目的。在这个方法中，它同时向人们提供了两套工具，一套是认识客体原型的工具，另一套是利用、改造客体原型的工具。控制论在认识一个系统的优点和特点时，总是力图吸取它到机器模型中去。这个特点在人工智能中表现得尤为突出。并且，控制论的方法反映了较高的人类认识的抽象水平，但它又总是有具体的技术手段和技术步骤来保证它得以实现。

其次，控制论方法的一个重要特点在于它是从整体上有机地把握客体。控制论方法告诉人们，要研究复杂的系统，单从结构上、基质上机械地研究是不行的，应当从整体上研究事物。控制论把着眼点放在表现整个系统整体性的现象上，这个现象就是行为。行为是整个系统内部状态和对外反应方式的综合体现。

这里值得注意的是，任何整体都是相对于分离而言的，人的真实认识对象都是分离出来的，如果把外部世界作为一个浑然整体，认识是无法进行的。从研究者的角度讲，系统总是相对的，艾什比就明确地讲过这一点。因此控制论的整体性观点，更确切更具体地说是分析与综合的统一。控制论的模型就既是一个分析体，又是一个综合体。

关于控制论的方法论意义的探讨是一个很广阔的研究领域，我们在这里只是提纲挈领地讲了几点，许多方面还要深入研究。

第二篇 信息论、信息科学 的基本概念与哲学、 方法论问题

信息论是一门新兴学科，它产生于本世纪40年代末，最早仅局限于通信领域，经过30年来的发展，由于现代自然科学发展的综合整体化趋势，各门学科的相互联系、相互渗透，信息的概念以及信息的一些基本理论已经超越通信领域，逐步推广、运用于其他学科。在此基础上，于60年代末至70年代初出现了信息科学。信息科学是在信息论基础上发展起来的，它涉及数学、通信理论、控制论、计算机科学、人工智能、电子学和自动化技术以及物理学、生物学等多个领域，与哲学关系也很密切。信息科学是一门边缘的学科，也是一门横断学科。信息科学的出现，在哲学方面提出了许多亟待解决的问题。本篇将概述信息论、信息科学的产生、主要内容及其研究进展，并对有关哲学与方法论问题加以概述与讨论。

第六章 信息论的形成与产生

科学来源于实践，信息论作为一门科学，其形成与产生当然也不例外。生产实践是人类物质和文明发展的基础，而物质与文明的进展又依赖于人类获取、传递、处理、加工和利用信息的能力。人类在生产过程中建立了人与人之间的关系，而要沟通这种关系就必须要有信息，要进行通信。通信是人与人之间交流信息的手段。

人类的通信离不开语言，在一定意义上，语言是通信的别名^①。语言是从劳动中并和劳动一起产生出来的。早期的人类直接面对面使用口头语言进行通信，交流劳动中所获取的信息。后来出现了用图形、象形文字等存贮、传递信息。早期的地中海文明使用的是一些简单的图形，用以表示物体。古埃及和古代中国使用象形文字。随着人类文明的进展，这些图形、象形文字缩简成为较正规的文字符号，从而出现了用字母组成的各种文字符号。

人们为了传递、存贮和利用信息，不仅需要各种文字符号，而且也利用除了语言外的其他各种信号。刚果的许多部落用击鼓声的高和低，烟的长和短作为传递信息的信号；中国古代的“举烽火为号”也是用火作为信号，进行光通信的一种原始方式。“结绳记事”的绳结也是一种信号，用以存贮信息、传递信息。

人类在社会实践中深深认识到获得信息、利用信息的重要性。中国古代孙子兵法中曾讲过：“知彼知己、百战不殆”，交战的双方要想取得战争的胜利，必须了解敌我双方的兵力、装

① 参看维纳：《人有人的用处》，商务印书馆1978年版，第56页。

备、战略、战术等有关信息，然后经过指挥人员的分析、研究，作出正确的判断与决策，才能取得战争的胜利。多少年来，人们获取信息、传递信息、利用信息，但对信息的认识，长期以来还是处于感性阶段，没有形成一门系统的科学理论。信息论作为一门科学，它是由于资本主义生产实践的需要以及近代自然科学的发展而逐渐形成起来的。

在科学史上，对通信的研究早就开始了，甚至在牛顿以前，这类问题就在物理学中出现过，特别是在费尔马（P.Fermat）、惠更斯（C.Huygens）和莱布尼茨（G.Leibniz）的著作中出现过，这三人对物理学都有爱好，但他们的注意力不是力学，而是光学，即视觉形象的通信问题。^①

然而信息论作为一门科学理论，其形成和产生的渊源可以追溯到19世纪。19世纪中叶到本世纪四十年代可以作为信息论产生前的准备阶段。自牛顿力学创立以来，从17世纪到19世纪在自然科学领域中机械唯物论的世界观占统治地位，机械唯物论否认客观世界存在着偶然因素，把偶然性和必然性绝对地对立起来，企图用拉普拉斯的决定论来解释一切。拉普拉斯（P.Laplace 1749—1827）是法国天文学家、数学家和物理学家。他曾经提出，只要知道了宇宙中所有的作用力及所有原子在某一时刻的坐标和速度，就能确定世界的全部过去和未来，这就是人们通常所说的拉普拉斯决定论。这是一种机械决定论的世界观。值得提出的是，正当绝大多数自然科学家在这种形而上学思想的束缚下，遵照机械决定论的观点思考问题的时候，美国物理学家吉布斯和奥地利物理学家波尔兹曼却首先把统计学引进物理领域，使物理学对客观世界中存在的不确定性和偶然性不得不加以考虑。把研究偶然性作为一种科学方法引入物理学，这是吉布斯的一大功绩。对

① 参看维纳：《人有人的用处》，商务印书馆1978年版，第9页。

此，维纳曾予以肯定，他指出，吉布斯的统计力学方法中隐含着把一个复杂的偶然事件看作许多局部偶然事件的无限概率之和^①。他在《人当作人来使用》一书中曾指出：吉布斯为了修正牛顿的传统学说而将偶然性的观点引入物理学。这种研究方法为信息理论的创立提供了方法论的前提。波尔兹曼指出熵是关于一个物理系统分子运动状态的物理量，表示分子运动的混乱程度，并且把熵和信息联系起来，提出“熵是一个系统失去了的‘信息’的度量”^②。偶然性，熵函数引进物理学就为信息论的产生提供了理论前提。他们虽然都涉及到有关信息方面的问题，但由于当时科学技术水平的限制，未能直接提出信息理论的问题。

随着资本主义的发展，特别是近几十年来生产及科学技术的发展，人们对传输信息的要求越来越高，因此怎样提高通信系统传输信息的能力和传输的可靠性，怎样对各种形式消息中所包含的信息作定量的描述，就成为迫切需要加以解决的课题。

提高通信系统传输信息的能力即提高通信系统的效率，就是尽可能用最窄的频带，尽可能快地传送信息并尽可能地减少能量的消耗，也就是提高通信的经济性；提高信息传输的可靠性，就是在信息的传输过程中，力图消除或减少噪声的干扰，以提高通信的质量。但是在通信的实践中，人们发现，在一定条件下，要同时达到上述两个要求，就会遇到矛盾：要减少噪声的干扰，信息传输速率就要降低；而提高了信息的传输速率，则噪声干扰就不可能有效地避免。这就是说，在一定的条件下要解决上述矛盾是困难的。为此，有人想到，在限定的条件下，同时提高通信的效率和可靠性的要求，可能存在一种理论上的界限，这就需要

① 维纳：《控制论》第二版，科学出版社1963年版，第46页。

② 转引自陈润生：《熵》，载《百科知识》1981年第10期，第78页。

应用数学理论，这样，从通信的实践中提出了应用数学理论指导实践的要求。

本世纪20年代，根据通信实践的需要，奈奎斯特（H. Nyquist）与哈特莱（L. Hartley）最早研究了通信系统的传输效率问题，奈奎斯特提出，电信信号的传输速率与信道频带宽度之间存在着比例关系。哈特莱提出，用对数作为信息量的测度，这样，消息就可以用数学方法从数量上加以测度。1924年奈奎斯特发表了《影响电报速度的某些因素》一文。4年以后，哈特莱于1928年又发表了《信息传输》一文，首次提出了消息是代码、符号，它与信息有区别（消息是信息的载体，消息的形式是多样的、具体的，如各种语言、文字、图象等等，而信息是指包含在各种具体消息中的抽象量）。他区分了信息和消息在概念上的差异，并提出用消息出现的概率的对数来度量其中所包含的信息，从而为申农的信息理论的建立奠定了初步基础^①。

到了40年代，随着雷达、无线电通讯和电子计算机、自动控制相继出现和发展以及防空系统的需要，促使许多科学技术工作者在各自的工作岗位上，对信息问题进行了大量的研究。正是由于实践的推动，使得科学家们能够从不同的角度对信息论中的一些概念和理论问题得出一致的结论。维纳在《控制论》一书中就指出，单位信息量的思想差不多是在同一个时候由好几位科学家同时提出来的，其中有统计学家费希尔（R. Fisher）以及申农和维纳本人^②。可见，信息论的产生有其历史的必然。

1948年申农发表了著名的论文《通信的数学理论》，1949年又发表了另一篇论文《在噪声中的通信》。当时申农在贝尔电话

① 参看Kenneth, M. Sayre: 《Cybernetics and the philosophy of Mind》，1976。

② 参看维纳：《控制论》第二版，科学出版社1963年版，第10页。

公司工作，他为了解决信息的编码问题，为了提高通信系统的效率和可靠性，在研究过程中，需要对信息进行数学处理，这就要求舍弃通信系统中消息的具体内容（如信息的语义），把信源发生的信息仅仅看作一个抽象的量。同时，由于通信的对象——信息具有随机性的特点，因此申农把用于物理学中的数学统计方法移植到通信领域，从而提出了信息的概念，从量的方面来描述信息的传输和提取的问题，并提出了信息量的数学公式。除了上述贡献外，申农还提出了通信系统模型以及编码定理等方面有关的信息理论问题。申农的这两篇著作确立了现代信息理论的基础，而申农也因此成为信息论的奠基人。此后，信息论就逐步发展成为一门独立的边缘学科。

40年代通信工作中所遇到的一个突出问题，就是怎样从收到的信号中把各种噪声滤除，以及在控制火炮射击的随动系统中如何跟踪一个具有机动性的活动目标，而各种噪声的瞬时值或火炮的跟踪目标的位置的有关信息都是随机的，带有偶然性，这就要求用概率和统计方法对它进行研究，用统计模型进行处理。维纳正是在研究这些问题的基础上，差不多与申农同时发表了两项论著：《控制论》（1948年）与《平稳时间序列的外推、内插和平滑化》（1949年）。维纳从控制和通信的角度研究了信息问题，主要是从自动控制的观点研究信号被噪声干扰时的信号处理问题，建立了维纳的“滤波理论”（通信与控制中的滤波问题，指的是从获得的信息与干扰中尽可能地滤除干扰，分离出所期望的消息）。维纳的这一工作正如他自己所说，他的某些思想是从苏联的哥尔莫戈洛夫（А.Н.Колмогоров）的早期工作得来的。这是指哥尔莫戈洛夫在1941年发表的《平稳随机序列的内插法和外推法》一文。^① 维纳在《控制论》发表不久，于1950年又发表了另

^① 参看维纳：《控制论》第二版，科学出版社1963年版，第10—11页。

一著作《人当作人来使用》。在这部著作中，维纳提出了信息量的概念、测量信息量的数学公式，叙述了信息概念形成的思想前提，同时把信息的概念又进一步推广，认为信息不仅是通信领域研究的对象，而且与控制系统有密切联系。维纳正是抓住了通讯与控制系统的共同特点，站在一个更为概括的理论高度，揭示了它们的共同本质，即通信与控制的共同特点的关键并不是环绕着电工技术，而是环绕着更为基本的信息概念。因此，维纳在更为一般化的高度上提出了信息概念，同时还提出了具有哲学意义的信息实质问题。维纳把信息的理论进一步推广到控制论领域。信息论成为控制论的一个基础理论了。

美国的统计学家费希尔，因为需要一个标准来估计实验数据内的信息，他从古典统计理论的角度研究了信息的量度问题。

从上可知，申农、维纳、费希尔各自从不同的方面（申农从编码方面，维纳从滤波理论方面，费希尔则从古典统计理论方面）研究了信息的理论问题，虽然角度不同，但却得到共同的认识：通信必须以随机事件为对象，通信和控制系统所接收的信息带有某种随机性质，通信的目的在于消除收信人的不定性，因此各种消息的共同特征在于消除通信中收信人的不定性，而要对消息作定量的研究，就必须把各种消息（信号、代码等）的这一共同特征抽取出来，略去其相应的具体内容，单纯从量的方面进行度量，为此就要用统计平均信息的概念来量度消息的概率分布，从而提出用统计数学方法处理通信的理论问题，并给出了信息量的数学公式。信息量等于被消除的不定性的数量，这是申农等人信息论的最重要的结果之一，于是任何一个事件，只要知道它的各个可能独立状态的概率分布，就可以求出它的熵值，从而求出它所能提供的信息量。从此，通信科学就由定性研究阶段进入定量研究阶段，这就为信息论及信息科学的研究奠定了初步的理论基础，并进一步推动了通信科学技术的发展，促使新兴学科

“控制论”的产生。由于对信息量可以用概率和统计的方法进行计算，因此，就能够求出各种通信系统的信息传输率，对它们进行分析比较，从而对它们的通信性能作出评价，以改进和提高信息的传输能力和可靠性；同时，由于申农等人对信息单纯是从量的角度进行描述，因此，对各种不同的形式的信号，可以用统一的通信理论，从量的观点去设计它们的传输系统，从而解决了同一信息可以用不同的信道进行传输，不同的信息可以用同一信道传输的问题；而且可以把不同种类的系统，如技术系统、生物系统和管理系统看作是对信息的获取、传递、加工、处理的信息调节控制系统，统一地进行研究，不仅促进了这些部门科学的发展，同时也为新兴学科“控制论”的产生提供了理论基础。

第七章 信息论的基本内容和提出的问题

信息论最早产生于通信领域，早期又叫做通信理论。申农是信息论的奠基人，申农所创立的信息论是一门应用概率论与数理统计方法研究信息处理和信息传递的科学。它主要研究信息的获取、变换、传输、处理等问题，其任务是解决电子通信技术的编码和抗干扰等问题，从而提高通信系统的传输效率和可靠性。

现对申农信息论的主要内容简略介绍如下：

第一节 信息概念与通信系统模型

所谓通信就是两个系统之间传递信息，由信源发出信息，通过信道传送信息，再由信宿（收信人）获取信息，这就构成通信系统。

那么什么是信息呢？信息在日常用语中，指的是消息、情报、指令、密码等等。信息是通过符号（如文字、图象等）、信号（如语言、有某种含义的手势动作、电磁波信号等）等具体形式表现出来的内容。那么，作为一般化的科学信息概念又是什么呢？前已指出至今尚没有公认的定义，这是因为目前学术界看法还不一致。世界上已经公开发表的信息概念与定义，前些年有人统计已有39种之多。有关的不同观点，请参看本书第十章第一

节。

信息作为一个科学概念是1948年申农首先在通信领域中提出的。他提出：“能否定义一个量，这个量在某种意义上能度量这个过程所‘产生’的信息是多少？”“量 $H = -\sum p_i \log p_i \dots\dots$ 它作为信息、选择和不确定性的度量。”^① 申农在这里把信息量的公式称作为不确定性的度量，把信息看作是不定性减少的量，信息就是两次不定性之差。我们用符号表示就是：

$$I = S(Q|X) - S(Q|X')$$

I代表信息，Q表示对某件事的疑问，S表示不定性，X为收到消息前关于Q的知识，X'为收到消息后关于Q的知识。

如果消息的内容是收信人已知，那么收信人收到消息后，就不会引起知识的变化（ $X = X'$ ），不定性没有减少或消除，收信人就没有得到任何消息；如果消息的内容，收信人事先并不知道，那么收到消息后就引起收信人知识的变化，不定性就有所减少或消除，所以信息就是消除或减少收信人的某种不定性。通信是两个系统之间以一定量（关于信息的质，申农当时未予考虑）的信息为其内容，以消除收信人的不定性为目的的联系关系，这种联系就构成了一个通信系统。

通信系统的框图如下：

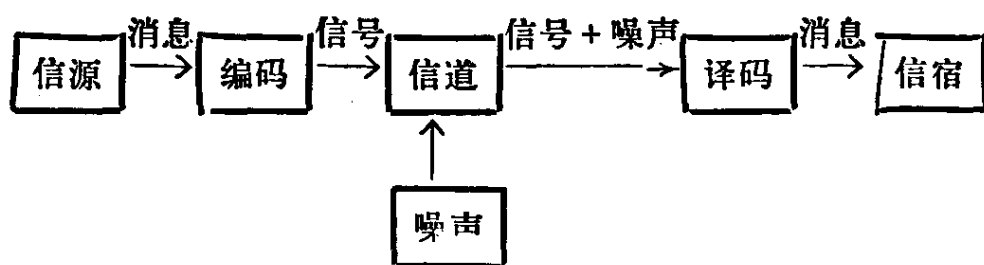


图7.1 通信系统框图

① 申农：《通信的数学理论》，上海市科学技术编译馆版，第7页。

对上图中的一些概念解释如下：

信源：

信源就是信息的来源——发出消息的来源。信息源可以是人、机器、自然界的物体等等。信源发出信息时，它一般以某种符号（文字、图象等）或某种信号（语言、电磁波信号等）表现出来，而表示信息的这些符号或信号称之为消息，消息的形式是具体的、多样的。消息一般可理解为信息的载体，它载荷着信息。

信源所发出的消息带有随机性，它是不确定的。如果消息是确定的，而且预先是知道的，那么对信宿来说，就无信息可言。假定有一人事先与你约定，在指定时间准时发出电报，电文内容预先你全知道，对你来说，从电报里就没有得到任何信息。如果电文事先你不知道，那么你就可以从收到的电文中获取信息。所以，作为信息载体而出现的消息是随机的、具有不确定性。

编码：

所谓编码就是把信息变换成信号的措施。“码”是什么呢？简单地说，它就是一个符号序列和将这些符号序列排列起来时必须遵守的一些规则。换言之，码就是按照一定规则排列起来的符号序列。这些符号的编排过程就是编码过程，编码过程分为两个部分：一是信源编码，信源编码就是把信源输出的符号序列，用某个给定的字母表中的字母编排成最佳的字母（又称码子）序列。如讲话时的语言，书写时的文字等都经过人脑，把各种语言文字按照一定的语法结构和规则进行编排，形成适当的语言文字，表达一定的信息；二是信道编码，就是把经过信源编码后的码子序列变换成适于在信道中传输的最佳信号序列。信号是多种多样的，如声音信号、电信号、光信号等等。编码设备（编码器）的输入端接到信息源，自信息源产生的消息进入编码设备后，就按照编码规则编成信号序列从输出端输出。例如，信息源产生的原

始消息是一篇用文字编成的文件，用电报传递时，经过编码，就用摩尔斯码的点、划和空白表示出来，通过信道，从输出端输出。在通信系统里消息常常不是经过一次编码就被送入信道进行传输的，要使消息变成适合于信道传输的信号常常要经过几次编码，如汉字要先编成四位数的阿拉伯数码，随后再被编成莫尔斯码，然后转换成脉冲信号，在信道中进行传送。

信道：

所谓信道就是信息传递的通道，是传输信息的媒质。信道是构成信息流通系统的重要组成部分。信道的关键问题是信道的容量，就是说，要求以最大的速率传送最大的信息量。从广义上看，信息不仅承担了信息的传输任务，而且也担负着信息的存贮任务。信息的传输过程，在某种意义上也是信息的存贮过程。如用书信传递信息，发信人把信息书写在纸张上，通过邮寄，收信人收到了信息，这是一个信息的传输过程，信息一经书写在纸上，纸张就成为存贮信息的载体。在电信系统中，传输信息的过程也存在着存贮过程，如两人打电话，总需用一定的时间，即使时间很短，但在这段时间内电路起着存贮信息的作用。而在现代通信系统中，由于使用了电子计算机，它可以存贮信号，待时传送，存贮作用更为明显。所以，从特定意义上讲，信道的传输过程也就是信息的存贮过程，信道的问题也就是要求以最大的容量存贮最多的信息。信道是多种多样的，有线信道，如同轴电缆、光导纤维；无线信道，如自由空间、电离层等。在复杂的电信系统中，信道不是单一的，而是多路的，信道的数量很大，它联系众多的信源、信宿而组成通信网络。

噪声：

通信的主要目标之一是使接收端收到一个与发送端尽可能相同的消息，但在许多情况下，实际上接收与发送消息之间常常有差别，其原因往往是由于噪声干扰所造成的。例如在电视屏幕上

出现许多闪烁着白点的“雪花”干扰，打电话时出现的嘶嘶声、喀喇声，这些是噪声干扰，常常影响通信效果，造成信息的某些失真。

在通信系统中所遇到的噪声干扰可分为两类：

1.系统外的噪声：如来自自然界的雷电、宇宙辐射等大气噪声以及海浪声，还有来自人为的发射的干扰信号等。

2.系统内的噪声：其产生原因如下：任何温度在绝对零度以上的物体中电子均有随机的热运动，这种电子随机热运动可以在电路中形成干扰，即噪声。再加上电流在运动过程中的起伏变化也会产生噪声。

译码：

当信号序列通过输出端输出后，必须经过翻译，复制成消息，即把信号翻译成文字、图象等等，这就是译码。信号必须通过译码，才能送到收信人手里，成为收信人需要了解的信息。所以，译码过程恰好与编码相反，译码就是编码的反变换。

信宿：

信宿即收信人，信息的接收者，可以是人，也可以是机器，如收音机、电视机等。

申农所提出的这一通信系统模型不仅适用于通信系统，也可以推广到其他非通信系统。这些系统都可以称为信息系统。例如，雷达是一个遥测系统，从信息论的角度看，也可以看作是一个信息系统，其信源是空间某一目标物，它的坐标、速度、形状等等都包含着信息，电磁波的传播和收发所通过的自由空间就是信道，我们可以用无线电波射向目标物，然后，再通过反射波收到它发回的信息。此外如遥感系统、计算机系统、控制系统等都可以看作是信息系统。

从信息论的角度分析，管理系统也可以看作是信息系统，基层单位可以看作是信源（或信宿），而领导机关也可以看作是信

宿（或信源）。各种机构、组织、了解情况的一些渠道则可以看作为信道，而各种报表、数据、指令等等都是信息。领导机关和各级组织，领导机关和基层单位，领导机关之间通过信息关系发生联系。领导机关的任务就是通过信息系统了解信息、处理信息，然后作出正确决策，发出指令，有效地组织和指挥这一系统的各种活动。

第二节 信息量与负熵

科学研究不仅要求定性，而且要进行定量处理。定性是定量的基础，而定量则是定性的精确化。申农把信息定量化后，使通信理论由定性进入定量阶段，从而使信息论成为一门更为完善的科学，同时也为信息论的进一步研究和发展奠定了初步的理论基础。

怎样对信息进行度量呢？早在申农以前，哈特莱就指出，从逻辑上讲，应当选择对数单位来度量信息^①。

举例如下：

某个被传递的消息是由 8 个英文字母构成，为方便起见，把它们从 A 排到 H，在这里采用 { 0, 1 } 二进制，单位为比特，故每个字母需要 3 个二进制数字排列：

A	1	1	1
B	1	1	0
C	1	0	1
D	1	0	0

^① L.Hartley, Transmission of Information, Bell System Technical Journal, 1928,7.

E	0	1	0
F	0	1	1
G	0	0	0
H	0	0	1

从上表可看出，具有 8 个不同字母的消息，每个字母只需 3 个二进制数字（或 3 比特）就可表示，即 $8 = 2^3$ ，取对数，则 $\log_2 8 = 3$ 。如有 m 符号组成的消息，采用二进制，则每个符号所含的信息量可用 $\log_2 m$ 来表示。

采用对数度量信息有其方便之处， H 单值地随 m 而增加，且具有可加性。可加性这一点意味着，两个消息加在一起的总信息量等于每个消息单独存在时各自信息量之和，即

$$\log(m_1 \cdot m_2) = \log m_1 + \log m_2$$

采用对数度量信息也符合我们对信息量的直观认识，如对于信息的传输，两个相同的信道是一个信道信息容量的一倍。

关于采用对数作为信息的度量，申农在《通信的数学理论》一文中也曾予以肯定，指出采用对数度量比较方便，理由是：

（1）实际上比较有用；（2）比较直观；（3）数学上比较合适^①。申农在肯定哈特莱的基础上，又进一步提出了一种方法，即排除信息的语义因素，把信息加以形式化，以便从数量上进行描述，而概率论则是申农信息论的数学工具。

客观世界中有一类现象在一定条件下是必然要发生的，如在标准大气压下，水加热到 100°C 时必然会沸腾；用手向上抛一石块，必然要落到地上。这种在一定条件下，必然发生的现象，称之为必然事件，具有确定性；反之，在一定条件下，必然不会发生的现象，如人能长生不死，人离开氧气能活下去等等，这类现象称为不可能事件。在生产斗争和科学实验中，除了上述两类现象外，还有另一类现象，这类现象在相同条件下可能发生，也

① 申农：《通信的数学理论》，上海市科学技术编译馆版，第 1 页。

可能不发生。例如，在相同条件下，投掷一枚匀称的硬币，可能是“花”面朝上，也可能是“字”面朝上；明年5月1日的天气，可能是“晴”，也可能是“阴”，也可能是“雨”。这种在一定条件下，可能发生，也可能不发生的事件，称为随机事件，它具有不确定性。而概率就是用来表示随机事件发生的可能性大小的一个量。

概率记为 p ，若 $p=1$ ，表示可能达极大值，成为必然发生的事件；若 $p=0$ ，则表示可能为极小值，成为不可能发生的事件；而一般地随机事件的概率是介于0与1之间的一个数（ $0 < p < 1$ ）。

客观世界中的任一事物都可以看作是信源，信源所发生的信息带有随机性，是不确定的。为了对信息从量上加以刻划，申农在当时提出了信息的统计模型。

信息量就是收信人知识变化的数量，即收信人收到信息后不定性减少的数量。

下面先用具体例子说明申农的 H 公式。

以掷骰子为例，骰子共有6个面，其6个面的质量是相等的，我们多次重复试验后，其每一面朝上的概率相等，即 $p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = p_5 = p_6$ ，而 $p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5 + p_6 = 1$ 。因此， $p_1 = \frac{1}{6}$ ， $p_2 = \frac{1}{6}$ ， $\dots$ ， $p_6 = \frac{1}{6}$ ，骰子的6个面中，每一面朝上的概率都等于 $\frac{1}{6}$ ，但骰子6个面中，究竟那一面朝上又有6种可能结果，可能是1，可能是2……也可能是6。所以其可能结果的量为6，采用对数作为不定性的度量，其不定性为 $\log 6$ 。考虑到，骰子每一面朝上的概率等于 $\frac{1}{6}$ ，其不定性等于 $\log 6$ ，则骰子每一面可能朝上的不定性的量为 $\frac{1}{6} \times \log 6$ 。

$\therefore$ 分数的对数等于分子的对数减分母的对数

$$\frac{1}{6} \cdot \log 6 = \frac{1}{6} \log \frac{6}{1}$$

$$\begin{aligned}
\therefore \frac{1}{6} \log \left(\frac{6}{1} \right) &= \frac{1}{6} (\log 6 - \log 1) \\
&= \frac{1}{6} \cdot -(\log 1 - \log 6) \\
&= \frac{1}{6} \cdot (-\log \frac{1}{6}) \\
&= -\frac{1}{6} \log \frac{1}{6}
\end{aligned}$$

由于掷骰子时每一面朝上可能的结果是等概的，因此其每一面可能结果的不定性的量都是 $-\frac{1}{6} \log \frac{1}{6}$ ，而整个掷骰子事件的不定性的量则为其每一面结果的和：

$$\begin{aligned}
&-\frac{1}{6} \log \frac{1}{6} - \frac{1}{6} \log \frac{1}{6} - \frac{1}{6} \log \frac{1}{6} - \frac{1}{6} \log \frac{1}{6} - \frac{1}{6} \log \frac{1}{6} \\
&-\frac{1}{6} \log \frac{1}{6}
\end{aligned}$$

它被称为熵，以拉丁字母H表示。

$$\begin{aligned}
H &= -\frac{1}{6} \log \frac{1}{6} - \frac{1}{6} \log \frac{1}{6} - \frac{1}{6} \log \frac{1}{6} - \frac{1}{6} \log \frac{1}{6} \\
&\quad - \frac{1}{6} \log \frac{1}{6} - \frac{1}{6} \log \frac{1}{6} \\
&= -\sum_{i=1}^{i=6} \frac{1}{6} \cdot \log \frac{1}{6}
\end{aligned}$$

符号 Σ 表示各项之和，字母*i*表示足标依次的变化（*i* = 1, 2, 3, 4, 5, 6,）所以上述数学表达式表示整个掷骰子事件的不定性的量。即整个掷骰子事件的信息量。

如用一般的数学表达式，则表述如下：

设某一事件 X，其试验结果是不确定的，有多种可能性，可

记之为 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, 相应的概率 P , 记之为 $p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$ 。

$$S = \begin{bmatrix} x_1, & x_2, & x_3, & \dots, & x_n \\ p_1, & p_2, & p_3, & \dots, & p_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ P \end{bmatrix}$$

其中, $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ 代表随机事件的整体 (或称随机事件集), $P = (p_1, p_2, p_3, \dots, p_n)$ 是事件 X 的概率分布, S 为信息结构。

采用对数作为不定性的度量, 则 x_1 可能结果的不定性的量为 $-p(x_1) \cdot \log p(x_1)$, x_2 为 $-p(x_2) \cdot \log p(x_2) \dots$, 一直到 $-p(x_n) \log p(x_n)$, 而整个事件 X 的不定性的量则是它们的和: $-p(x_1) \log p(x_1) - p(x_2) \log p(x_2) \dots - p(x_n) \log p(x_n)$ 。其公式为:

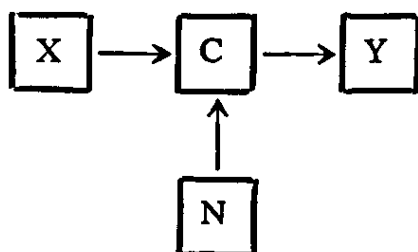
$$H(x) = - \sum_{i=1}^{i=n} p(x_i) \log p(x_i)$$

$H(x)$ 为信息熵, 即事件 X 整体的信息熵。信息熵亦即信源熵。这是因为不定性的量在信息论中是用两个符号来表示的。一个是信息熵 $H(x)$, 是从信源的整体角度考虑, 它代表信源整体的平均不定程度, 信息熵是在平均意义上表征信源的总体特性的, 即信源在客观总体上的平均不定性的量。某一信源, 不管它是否输出符号, 只要这些符号具有某些概率特性, 必有信源的 H 值, 这 H 值是在总体平均上才有意义, 因而是一个确定值, 一般写成 $H(x)$, X 是指随机变量的整体 (一般用概率分布表示)。另一个是信息量 $I(x)$, 是从信宿角度考虑, 指信宿收到信息后解除不定性的量, 它指主体对客体的不定性解除程度, 不定性减少的程度或获得新知识的程度, 所以信息量 $I(p)$ 只有当信源输出符号而被接收者收到后, 才有意义, 它与信宿收到信息后, 对不定性解除程度有关。

如果信宿收到信源的符号后, 全部解除了对这个符号的不定

度,那么信息熵与信宿收到的信息量完全相等,因此 $H(x) = I(p)$,两者数值完全相等,其数学表达式是一致的。

一般来讲,信宿收到的信息量有如下三种情况。设一个通信系统:



X: 发端发出的信号; C: 信道

Y: 收端收到的信号; N: 噪声

$H(x)$: 信息熵。

$H(Y)$: 信宿收到的信息量;

$H(X|Y)$: 条件熵, 即信宿收到信号Y后, 对信源X仍有不定度, 或由于干扰而失去的信息。

1. 无干扰的理想情况: 信源发出的信号X与信宿收到的信号Y相同, 则 $H(X) = H(Y)$, 它表示信宿Y收到的信息量 $H(Y)$ 与信源X的熵 $H(X)$ 相等, 说明信宿Y完全解除了对信源X的不定度, 表示信宿Y对信源X的不定度完全消除。则

$$I(X) = H(X) = H(Y)$$

2. 有干扰情况: 信宿收到信号Y后, 由于信息传输过程中的干扰而损失了一定量的信息, 因此信宿Y对信源X的不定度并未完全消除, 所以信宿Y实际收到的信息量应为信源熵 $H(X)$ 减去由于干扰而失去的信息量 $H(X|Y)$, $H(X|Y)$ 为条件熵, 表示由于干扰而失去的信息量, 即信宿收到信号Y后, 对信源X仍然存在不定性的数量, 则信宿Y收到的信息量为:

$$I(X) = H(X) - H(X|Y)$$

3. 完全是干扰: 由于干扰很大或全部是干扰, 所以信宿Y根

本收不到信源 X 的任何信息, 即 $H(X) = H(X|Y)$, 信源发出 X 信号后, 由于干扰而使信息全部丢失, 因此信宿 Y 收不到任何关于 X 的信息, 则

$$I(X) = 0$$

所以信息量 $I(P)$ 等于信宿消除的不定性的数量, 信宿收到信息后, 不定性解除的越多, 则获得的信息量就越大。

这里提出一个在信息论中与信息量有关的重要概念: 互信息 $I(X; Y)$ 。所谓互信息 $I(X; Y)$ 表示信源发出 X 信号与信宿收到 Y 信号后, 两者之间的相互关系, 即信宿收到 Y 后所获得的关于 X 的信息量, 或者说信宿 Y 实际上获得的关于 X 的信息。

互信息与信宿收到的信息量, 两者在数值上是相等的, 即 $I(X) = I(X; Y)$, 但两者考虑的角度不同, $I(P)$ 只是从信宿角度考虑, 即信宿所获得的信息量, 而 $I(X; Y)$ 则从信源与信宿两者之间的相互关系角度考虑, 信宿收到 Y 后所包含的关于 X 的信息。当信宿收到 Y 后完全解除了关于 X 的不定度, 即没有干扰, 信号 X 与信号 Y 一一对应, 所以互信息就等于信源熵, 即 $I(X; Y) = H(X)$; 若有干扰, 那么信宿从 Y 中就不能全部获得关于 X 的信息, 因此互信息的量就小于信源熵, 要减去由于干扰而丢失的信息, 即 $I(X; Y) = H(X) - H(X|Y)$; 若干扰很大, 信息全部丢失, 信宿收到 Y 后基本上与信源 X 无关, 信宿收不到关于信源的任何信息, 即 $H(X) = H(X|Y)$, 则 $I(X; Y) = 0$ 。

关于信息熵 $H(X)$ 的公式: $H(X) = - \sum_{i=1}^{1-n} P(x_i) \log P(x_i)$, 在 Σ 前冠以负号, 这一负号并不表明熵的量值是负的。与此相反, 它的量值永远是正的, 因为按照定义, 概率 P 小于 1, 而大于零 ($0 < P < 1$), 其对数取负值, $\log P(x_i)$ 永远是负的, 乘以其前的负号, 其值仍为正。

以 2 为底的对数, 单位称比特(bit) (为最常用的单位), 即

二进单位，例如掷一枚匀称的硬币，只有两个可能值，而且两者的概率相等，则 $\log_2 2 = 1$ 比特。

以3为底的对数，单位称铁特(Tet)，即三进单位。

以“e”为底的对数，单位称奈特(Nat)，即自然单位。

以“10”为底的对数，单位称笛特(Det)，即十进单位。

维纳曾说过：“信息量是一个可以看作几率的量的对数的负数，它实质上就是负熵。”^①

对信息的度量采用什么名称呢？申农采用了熵。申农在使用这一名称时曾征求过著名数学家冯·诺依曼的意见，当时申农想把它称为“不定性”，冯·诺依曼建议可以称它为熵，其理由之一是，在统计力学中已经用描述不定性。可见“熵”这一名称是从物理学中借用过来的。

早在1864年克劳修斯(K. Clausius, 法国物理学家)在《热之唯动说》一书中，提出一个物理量，这就是熵（用符号S代表）。他发现：如果一个物体的绝对温度为T，我们给该物体加进热量 ΔQ ，该物体增加的熵为 $\frac{\Delta Q}{T}$ ，即 ΔS 。

ΔS 代表吸进热量之后，物体的熵(S_2)与吸进热量之前的熵(S_1)之差，即 $\Delta S = S_2 - S_1$ 。如用积分形式表示：

$$S_2 - S_1 = \int_{t_1}^{t_2} \frac{dQ}{T}$$

同样，如从该物体取出热量 ΔQ ，则该物体的熵就减少 ΔS 。

设有两物体，一物体温度(T_1)较高，另一物体温度(T_2)较低，把两者靠在一起，就有热量 ΔQ 从温度较高的物体转移到温度较低的物体，那么温度较高的物体所减少的熵为 $-\frac{\Delta Q}{T_1}$ ，而温

① 维纳：《控制论》第二版，科学出版社1963年版，第65页。

度较低的物体所增加的熵为 $\frac{\Delta Q}{T_2}$ 。因此两物体的总熵变化为：

$$\Delta S_{\text{总}} = -\frac{\Delta Q}{T_1} + \frac{\Delta Q}{T_2}$$

由于 $T_1 > T_2$ ，所以， $\frac{\Delta Q}{T_1} < \frac{\Delta Q}{T_2}$ 。因此，两物体的总熵变化是正的。

相反，如果热量 ΔQ 从温度较低的物体流向温度较高的物体，那么温度较低的熵就会减少 $\frac{\Delta Q}{T_2}$ ，即 $-\frac{\Delta Q}{T_2}$ ，而温度较高的物体就会增加 $\frac{\Delta Q}{T_1}$ 。此时，两物体的总熵为：

$$\Delta S_{\text{总}} = \frac{\Delta Q}{T_1} - \frac{\Delta Q}{T_2}$$

则这个值小于零是负的。

熵是物质系统的一个状态函数，温度、体积也是物质系统的状态函数，温度所表示的物体状态是冷还是热；体积则表示物体是大还是小；那末熵表示什么状态呢？它表示系统的紊乱程度引入熵这一物理量后，对热力学第二定律的内容就可以用熵函数来描述。

热力学第二定律告诉我们，热量总是由温度较高的物体流向温度较低的物体，而不能自发地由低温物体传向高温物体。在封闭的系统中实际发生的过程，总使孤立系统的熵的数值增大，所以 ΔS 大于零的过程是允许的，而 ΔS 小于零的过程是不行的，所以热力学第二定律也称为熵增加原理。熵在热力学中是用来说明热运动过程不可逆性的一个物理量，反映了自然界出现的热的变化过程是有方向性的，是不可逆的。

尽管克劳修斯对熵作了严格的数学推导，但很多科学家对它

仍感到很抽象。熵代表系统的什么状态？反映了系统的什么微观本质？1872年波尔兹曼在研究气体分子运动过程中，对熵首先提出了微观解释，后经普朗克·吉布斯进一步研究，解释更为明确。他们认为：在由大量粒子（原子、分子）构成的系统中，熵就表示粒子之间无规则的排列程度，或者说，表示系统的紊乱程度，系统越“乱”，熵就越大；系统越有序，熵就越小。维纳曾说过：“一个系统的熵就是它的无组织程度的度量。”^①如前所述，根据热力学第二定律，一个系统在孤立的情况下，总是自发地由有序到无序，熵总是增加的。如在一个封闭的系统中装有一个容器，内有两种气体，一种气体停留在容器的一端，而另一种气体停留在容器另外一端，这时，两种气体内的分子分别处于有序状态，系统的熵最小，但这种状态不会保持很久，不一会儿，它们就混合起来，随着两种气体分子逐渐在整个容器内扩散，分子之间的排列越来越无序，熵就越来越大，在两种气体完全混合时，分子紊乱程度达最高点，这时，熵达最大值，所以熵是系统的无序状态的量度。

熵这一概念出现后，就与信息紧密地联系在一起。波尔兹曼曾写道：“熵是一个系统失去了的‘信息’的度量。”熵的获得永远意味着信息的丢失，而不是别的。一个系统有序程度越高，则熵就越小，所含的信息量就越大，反之，无序程度越高，则熵就越大，信息量就越小。信息和熵是互补的，信息就是负熵。所以用来表示信息熵的公式与热力学熵公式有一区别，在信息熵公式中有负号，而热力学中则没有。这一点恰恰表明，它与热力学公式所代表的方向相反，不是刻划系统无序状态，而是表示系统有序程度，表示系统获得信息后，无序状态的减少或消除，即消除不定性的大小。例如，做一个实验，有多种可能结果：成功，失

① 维纳：《控制论》第二版，科学出版社1963年版，第11页。

败，部分成功部分失败等。在未得知结果前，思想上处于一种不确定的状态。当得知成功的消息后，思想上的不定度（无序状态）也就消除了。

关于信息熵与热熵的关系问题，法国物理学家布里渊（L. Brillouin）于1956年在其专著《科学与信息论》中作了论述，他认为申农信息熵的数学表达式与热力学中的熵的数学表达式是一致的。信息熵是解除不定度所需信息的度量，而热熵是系统紊乱程度的度量，要使紊乱的系统有序化就需要有信息，而信息的丢失就表示系统紊乱程度的增加，两者互为负值。布里渊进一步导出了它们之间的相互关系，即

$$1 \text{ 比特} = k \ln 2 = 10^{-16} \text{ 尔格} / ^\circ \text{K}$$

k为波尔兹曼常数。

第三节 信息论的基本问题与研究进展

申农在《通信的数学理论》一文引言中曾说过：“通信的基本问题是在通信的一端精确地或近似地复现另一端所挑选的消息。”^①这句话表达了通信系统的基本问题是要解决通信的有效性与可靠性这两个方面的问题，即以最大的速率传递信息，而且要保证在干扰存在的条件下，能够最佳地和准确地再现消息。为此就涉及从信源到信宿的通信全过程。申农信息论的基本问题涉及到信源、信宿、信道以及编码问题。现分别指出如下：

信源问题：信源问题的核心是信源包含的信息到底有多少？这要作定量的描述，用信息熵 $H(x)$ 亦即信源熵来测度。

① 申农：《通信的数学理论》，上海市科学技术编译馆版，第1页。

信宿问题：就是收信人能收到多少或提取多少由信源发来的信息量。这里不涉及信息的意义及对收信人是否有用即所谓实效性的问题。

信道问题：主要是信道最多能传送或存贮多少信息量，即信道容量的问题，从通信的有效性出发，它要求以最大的通信速度（信息传输率）传送最大的信息量。信息传输率 R 在信道的性质给定后，它随信源的性质而变化，如果信源发出的消息序列中多使用长的符号，所需的时间就长，信息传输率就低，反之，消息序列中多使用短的符号，则时间就短，但由于信息熵小，信息传输率仍然低，可见，信息传输率相对于消息序列中符号出现的概率 P 存在着某个最大值。这一最大的信息传输率称为信道容量。

$$C = \max_{P_i} R$$

R 为信息传输率，

$$R = \frac{\text{（每个消息的）平均信息量}}{\text{（每个消息的）平均时间}}$$

如果消息 x_1, x_2, x_3 分别为 τ_1, τ_2, τ_3 秒长，它们出现的概率分别为 p_1, p_2, p_3 ，信息传输率 R 的分子——每个消息的平均信息量 H 为：

$$H = -p_1 \log p_1 - p_2 \log p_2 - p_3 \log p_3$$

在 n 个符号的序列中，消息 x_1, x_2, x_3 分别含有 np_1, np_2, np_3 个，全部必须时间为：

$$np_1 \tau_1 + np_2 \tau_2 + np_3 \tau_3$$

因此每个消息的平均时间 τ 为：

$$\tau = p_1 \tau_1 + p_2 \tau_2 + p_3 \tau_3$$

信息传输率 R 为：

$$R = \frac{-p_1 \log p_1 - p_2 \log p_2 - p_3 \log p_3}{p_1 \tau_1 + p_2 \tau_2 + p_3 \tau_3}$$

以一般形式表为:

$$R = \frac{-\sum p_i \log p_i}{\sum p_i \tau_i} = \frac{H}{\tau}$$

在实际的通信系统中,信息传输过程中总是存在着干扰,因此提高系统的可靠性乃是信息论的基本问题之一。而有效与可靠地传递信息,就必须以无差错或最小的差错并尽可能快地进行传输。但是,当信号由信源发出,通过信道直到信宿接收的过程中,由于随机噪声的干扰,在接收端往往造成差错而失真。为此,必须排除干扰,提高接收端的识别率,这就涉及编码问题以及滤波理论等问题。

编码问题: 信息发出消息,在其被送入信道前往往要经过编码过程,消息之所以要经过编码是因为:(1)信源发出的原始消息不适于直接在信道上传输,只有经过编码,才能使消息成为适合在信道上传送的具体形式。例如,打电报,把文字符号转换成莫尔斯电码;在电视系统中,把光景转换成对应的电压。

(2)为了对抗信道中的噪声干扰,需要把消息编码成不易为干扰破坏的具体形式,以免在接收端再现消息时引起失真。(3)信源发出消息经过编码后,使信源熵的传输速度接近于信道容量。所以编码问题就是要从理论上说明,如何编码,使信源发出的消息能充分表达,信道的容量能充分被利用,并能在接收端无失真地再现消息,以提高通信系统的有效性与可靠性。

编码定理是信息论中的重要组成部分。在编码中所使用的编码规则应该满足下列条件:(1)保证在编码时所使用的码子序列中码元(即所用的编码符号)尽可能少。码元少,则信道一定时,信道的容量就大,从而在这种信道容量下,可以提高信息传输的有效性。以英文字母为例,有些字母是较常出现的,若对常用的字母用较短的编码组合表示,而对不常用的字母用较长的编码组合表示,则通信的传输有效性可以得到提高。这就出现了最

佳化编码问题。例如，设英文字母表中的字母 C 的概率为 P_c ，而对应这一字母的编码组合长度，即组合中码元的个数为 L_c ，则组合的平均长度为：

$$L = \sum_{c=1}^m P_c L_c,$$

最佳编码问题，就是如何使 L_c 取适当的数值而使 L 达到最小值。

(2) 要求通过编码后，能从编码的码子序列中无失真（或限定失真大小）地恢复原始符号序列的概率为最大，其目的是为了无失真或失真较小的传输信息，以提高信息传输的可靠性。例如，在通常的编码组合中加上辅助的码元，如在传输过程中，由于干扰产生了错误，就可以通过辅助的码元与信息码元的关系发现或纠正错误，这种编码叫纠错编码。纠错编码可以提高通信过程中的抗干扰能力，从而增加系统的可靠性。申农从提高通信系统的有效性与可靠性出发，提出了有关的三个编码定理，并作了一些证明。申农的第一定理是无失真信源编码定理，研究了信息熵与编码长度之间的关系；申农的第二定理为信道编码定理，指出在给定信道的条件下，总可能找到一种编码方法，使译码的错误概率为任意小；申农的第三定理为限定失真的信源编码定理，指出在限定失真的条件下，失真度与信息传输率之间的关系。总之，申农认为只要在信道传输消息前，对消息进行适当地编码就可以保证即使存在干扰，也可以最佳地传送和准确地再现消息。这就是申农所提出的三个定理，在当时是对信息论的两个基本问题（有效性与可靠性）的一种理论上的解决。

申农在其1948年的论文中，关于信源编码以及信息通过信道传输的编码定理等方面，其证明与后来的成果相比，较为粗糙，但申农在以后的论文中，如1949年的《在噪声中的通信》，1957年的《对于噪声信道编码定理的某些结果》和1959年《高斯信道中最佳码的错误概率》等文中，对原来的某些结果又作了严格推

导和进一步深化。申农所提出的这些定理，后来的信息论工作者又进一步作了证明。如申农阐明：对于一个噪声信道，其相应的信道容量为 C ，如果在传输信息时所用的码子足够长和有最佳的选择，则在信息传输率 $R < C$ 时，就可以得到无限接近于无错误的传输，而当信息传输率 $R > C$ 时，则不可能得到可靠的传输（即申农第二定理）。这一定理1954年为费因斯坦(Feinstein)、1952年为范诺(Fano)、1957年为沃尔弗维茨(Wolfwitz)所证明。从50年代到60年代初，关于申农信息论的研究工作主要集中在讨论申农信息论的基本问题上，即后来人们所归结的申农定理与费因斯坦引理问题上。

从60年代以后直到目前，申农信息论发展比较活跃的方向，是信源编码理论与多路通信理论。

信源编码问题即信源的压缩处理问题，其基本思想是：（1）对消息空间引入误差度量；（2）在消息传递过程中可允许有一定程度的失真度存在。从而可以大大节省信源信号的代输量，只需把最必要的消息传出去就行。这一基本思想早在1948年申农已经提出，1959年申农在《对离散信源在逼真度准则下的编码定理》一文中，对信源编码问题又作了重新论述，60年代初，苏联的哥尔莫戈洛夫、皮涅克尔(Пинекер)等人在研究信息量的基础上引入了 Σ -熵。60年代末，由于通信技术的需要，申农、盖拉格尔(R. Gallager)、别格尔(T. Berger)等人把 Σ -熵发展为信息率失真函数理论〔信息率失真函数 $R(D)$ ，即指在失真（误差）限度以下，对于给定信源所要求的最小的信息传输率〕，并且全面发展了信源编码理论。对信源编码理论的推广与实现问题，对信息率失真函数的计算问题，目前在研究中亦有所进展。

随着近代通信技术的发展，多路通信的理论研究近来也很活跃。关于多路通信的思想最早应追溯到60年代初申农所提出的双向通信问题，所谓双向通信是指两个方向相反的通信系统，双方

同时具有发、收设备,而且在双方内部发、收情况可以互相参考。双向通信的模型是由两个反向的经典模型组成,但信道是一个共用的双向传输信道,而且在信道两端的编码器(发送机)和解码器(接收机)之间有互相传输消息的途径或仅有由编码器至解码器的消息传输途径。双向通信本身就体现了网络化的思想。随着通信系统网络化思想的发展,近年来对各种类型的多路通信系统进行了研究,如译码输入相关多址信道系统,译码输出相关多址信道系统、一般译码相关多址信道系统等等。信息论的这些研究进展是与计算机网络、大系统、系统工程的实际需要相关的。

除了上述信源编码与多路通信问题外,近年来关于申农理论中信息量的研究也十分活跃,如各种广义信息量(如 α -熵, β -熵)理论的出现,以及现有信息量如估值、判决、滤波(非线性)、识别理论上的应用等等。关于信道的研究,除了上述多路系统外,还有反馈信道、变参数信道等问题^①。近些年来,关于算法信息论、近代保密学、光通信中的信息处理问题、遗传学、投资决策中的信息处理问题也不断取得进展。

^① 参看胡国定、沈世铨:《申农信息论若干新进展与新结果》,载《信息论与沃尔什函数》,中国电子学会信息论专业学会编,1980年,第18—22页。

第八章 从信息论到信息科学

申农的信息理论，经过50—60年代许多学者的研究，逐渐发展成一门相当完整的科学理论。申农的信息论是以通信系统模型为对象，以概率和数理统计为工具，从量的方面来描述信息的传输和提取方面的问题，所以称统计信息。它研究信源能够给出多少信息量，信道能传送多少信息量，而信宿又能收到或提取多少信息量。由于申农的信息理论，对信息所作的定量描述是以概率论和数理统计为基础，使信息可以定量地进行计算，从而使信息论成为一门科学，这正是申农的功绩。同时，也正因为如此，它只是对信息作定量的描述而未考虑信息的其它方面，如信源发出信息的语义（意义）如何？怎样对之进行定量描述？信宿收到信息后的效用如何？价值怎样？有无相对性？这些问题涉及信息的语义与实效，或者说信息的意义与价值等问题，而这些正是申农理论的不足之处。

任何信息都包含统计信息、语义信息和有效信息三个方面。早在1949年韦弗尔（Weaver）与申农曾经共同提出过信息问题可分为三级：第一级即申农所研究的问题称通信的技术问题；第二级是信息的意义问题；第三级是信息的实效性问题。由于历史条件的限制，申农的理论只是从通信的技术角度，解决了统计信息问题，而对第二级、第三级问题，即语义（意义）信息和有效信息，申农假定对任何观察者只是一个常数，即是不变的，因而没有加以考虑。申农自己也说过：“通信的语义方面的问题与工程

问题是没有关系的。”^①1953年哥尔德曼(S.Goldmen)曾经指出过申农的缺点,提出申农的信息理论并没有考虑信息的内容以及接受者的使用价值和重要性。这些问题,申农当时虽然知道,但由于历史条件的限制,未能加以解决。

随着近代科学的发展,由于科学技术的相互渗透与相互影响,信息论中的一些概念和基本理论已经越过通信领域而渗入其他学科(如生物学、医学、仿生学、语言学、经济管理科学等等),而信息概念及其理论在其他领域中的推广和运用,以及其他新兴学科如系统科学的出现和发展,原来只从统计角度,局限于从通信领域的申农信息理论,其不足之处就更加明显地暴露出来了,并且要求予以克服,这就进一步推动信息论的发展,并促使信息科学的产生。

第一节 信息科学的基本内容

由于信息论广泛渗入其他学科,普遍运用于各个领域,信息理论在现代科学技术发展中所占有的重要地位,日益为人们所认识。同时,由于它的普遍运用,信息论所研究的范围不仅涉及客观现实的一切领域,而且也涉及人的思维领域,内容复杂,涉及面广,因此,对信息的概念和实质、信息熵、信息量以及语义信息、有效信息、模糊信息等问题的研究就提上了日程,要求有更确切的理解和更一般的理论,从而提出了信息科学问题。

信息科学是以信息论为基础,并与电子学、计算机和自动化技术、生物学、数学、物理学等科学相联系而发展起来的。它的任务是研究信息的性质,研究机器、生物和人类对于各种信息的

^① 申农:《通信的数学理论》,上海市科学技术编译馆版,第1页。

获取、变换、传输、处理、利用和控制的一般规律，设计和研制各种机器，以便尽可能地把人脑从自然力的束缚下解放出来，提高人类认识世界和改造世界的能力^①。因此，它所研究的范围要比申农理论所局限的通信领域广泛得多，要求它更为一般化，并且克服申农理论的缺陷，适用于各个领域，因此信息科学应该是一门新的横断学科。

信息科学是70年代提出的，我国正式使用信息科学这一提法，并把它作为一门正式学科也是近几年的事，因此信息科学还处于发展的初期阶段，是一门正在形成中的科学。当前，对信息科学所研究的内容和范围问题，存在着不同的看法，现在尚无定论，大体有以下几种^②：

1.以信息论为基础，把控制论、系统工程、计算机咨询系统、仿生学、人工智能都包括在内，形成一门综合性的学科。如认为：“信息科学这个领域大体上包含着信息论、控制论、电子与自动化技术、计算机、仿生学、人工智能等等各个方面。信息论与控制论是信息科学的理论基础，电子技术、自动化技术、计算机则提供了信息科学的主要技术手段，而仿生学、人工智能是今后信息科学发展的新天地。”^③

2.冲破申农理论的信息概念，把已有的规律与理论应用于物理学、化学、生物学、心理学、管理科学……等等中去，相互渗透、相互贯通，逐步建立一门新的科学。

① 参看冯秉铨：《现代科学技术中的信息科学》，载《百科知识》，1980年第5期，第48页。

② 参看蔡长年：《信息论专业学会第三届年会开幕讲话》，载《信息论与沃尔什函数》，中国电子学会信息论专业学会编，1980年，第9页。

③ 冯秉铨：《现代科学技术中的信息科学》，载《百科知识》，1980年第5期，第48页。

3. 由于申农理论所研究的基本问题是信源、信道及编（解）码问题，其中信源问题只涉及信息源所给出的信息编码及其统计特性，而对信源如何产生信息和信宿如何使用信息的问题，则并未解决。因此，必须研究信息的产生以及人类如何有效地利用信息，从而提出信息科学是研究信息的产生、获取、变换、传输、存储、处理、显示、识别和利用的科学。意大利学者朗高（G. Longo）1975年在其所编的《信息论，新方向和未解决的问题》文集序言中，提出信息概念有两个中心问题：（1）信源（典型：大自然）如何产生信息？（2）信源所产生的信息为使用者所关切的特征是什么？据此，他认为信息科学是研究信息的产生、获取、变换、传输、存储、处理、显示、识别和利用的科学。

除了以上三种见解外，还有人对信息科学的内容、研究范围提出如下的看法，认为信息科学是以信息作为主要研究对象，以信息的运动规律和应用方法为主要研究内容，以扩展人类的信息功能（特别是智力功能）为主要研究目标的一门新兴的、边缘的、横断的综合性科学。其研究范围是：

1. 探讨信息的本质；
2. 研究信息的度量；
3. 阐明信息的运动规律；
4. 揭示利用信息进行控制的原理和方法；
5. 寻求利用信息实现最佳组织的原理和方法。

第1项涉及到信息是属于物质或精神范畴的问题，因此与哲学有关；第2项是研究信息的度量方法；第3项是研究信息如何产生，如何提取，如何检测、变换、传递、存贮、处理和识别的规律，以上两项属于信息论的基本领域；第4项是控制论，包括信息仿生学和人工智能；第5项是系统论，包括运筹学、系统工程、耗散结构理论和协同学等。因此，信息科学的基础是哲学、数理化和生物科学；它的主体是信息论、控制论和系统论；主要

的工具包括电子科学和计算机科学。^①

第二节 信息科学的研究进展

如上所述,当前对信息科学的内容和研究范围有不同的理解,涉及面广,很难一致。我们认为信息论、信息科学的应用与信息科学本身应该有所区别。信息科学是一门新兴的横断学科,涉及很多科学部门,但也不能把它看作包罗万象的科学之科学。关于信息论与信息科学的应用问题,本书将在下一章中略加概述,这一节主要是介绍与信息科学本身有关的方面的一些研究进展,如语义信息、有效信息、模糊信息问题,下面分别加以概述。

关于语义信息(意义信息)的研究进展

语义信息(意义信息)是指信源发出的信息所包含的意义。任何物体所发出的信息必须具有一定的意义,如果用语言表述,则指信息的语义,即语言的含义,当然不仅语言信息包含有一定的意义,其他的信息也具有一定的意义。从广义上看,人、动物、机器等的行为和动作都包含有一定的意义。例如,体育教员的示范动作,蜜蜂的舞蹈,昆虫分泌信息素的气味等等,都具有一定的含义,所以任何信源发出的信息都具有一定的语义(意义)。信源发出的信息,如果只是从量的方面来看,信息量可以相等,但是信息量相等的信息,其意义却可以很不相同甚至完全不同。比如人们发出“O”的声音,频率不变则没有意义;音调如有变化,当变成阳平(第二调)就表示“哦?怎么啦?”这里带有疑问的含义;如再变为去声(第四调),那就表示“啊!我明

^① 参看钟义信:《信息科学的基本问题》,载《系统理论中的科学方法与哲学问题》,清华大学出版社1984年版,第176—177页。

白了！”表示问题已经得到解决。同样三个“0”，它们的信息量相等，但意义却不相同，而且还存在这些不同意义的信息是否能够为信息接受者所理解，理解的程度又如何等等问题。所以，信息的意义问题，涉及信息发送者发出消息的含义如何定量？同时也涉及信息接受者对发送者意图的理解程度如何定量？因而涉及信息发送者与接受者双方的主观方面的信息意义的定量。这比起只适用于从客观方面、适用于通信技术问题的申农信息度量方法来说，无疑要复杂得多，也是申农的理论无法加以解决的。

60年代以来，有些人提出了语义信息问题，并作了一些研究，如1952年卡尔纳普（Carrap）提出的语义信息，1974年哥廷格尔（Gottinger）的无概率（主观）信息等等^①，但目前对语义信息的度量问题尚未能够得到很好的解决。

关于有效信息（相对信息）的研究进展

有效信息指信源所发出的信息被信宿（如收信人）收到后所起的效果和作用，即信息的实效、效用（或信息的价值）问题。信源发出消息后，对不同的接受者、使用者、其效用或价值是不相同的。同样的消息对于不同的对象，在不同的时间、地点和条件，其价值可以不同甚至完全不同，所以信息的效用问题亦称相对信息。例如中国女排夺得第三届世界杯女子排球赛冠军的消息，对于中国人民和其他国家的人民，其价值是不相同的，中国人民从中受到极大的鼓舞，而有的国家则无所谓。而同一消息，对不同的人，在不同的时间、地点，其价值也不同，资本主义国家股票市场的行情，同一消息对资本家来讲，得知的早晚，价值大不相同，可以发财，也可以破产。由于申农的理论没有考虑信息对于收信人的效果和作用，因此在需要考虑收信人、使用者的需要

^① 参看H.W.Gottinger, Concepts and Measures of Information. CISM, Courses and Lectures No.29, 1975。

和目的时，信息对系统使用的后果和效益，申农的信息理论就显现出严重的不足，没能加以解决。

收信人收到信息后，它的效用如何？这是收信人最为关切的一个问题。目前已日益为人们所注意，成为信息科学需要加以研究的课题。

1968年贝里斯 (M. Belis) 和高艾斯 (S. Guiasu) 在统一考虑信息的量和质 (即信息的有效性) 的基础上，首先提出了对信息的量和质进行统一的量度，为此，他们在申农的信息结构上引入一个“有效分布” U ， $U = (u_1, u_2, \dots, u_n)$ ，每一个 u 是第 i 个事件出现的效果，有效信息结构 S^* 为①

$$S^* = \begin{pmatrix} e_1, & e_2 \cdots, & e_n \\ u_1, & u_2 \cdots, & u_n \\ p_1, & p_2 \cdots, & p_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E \\ U \\ P \end{pmatrix}$$

其中， $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ 代表随机事件集， $P = (p_1, p_2, \dots, p_n)$ 为遍于事件 E 上的概率分布。

从这一结构上，可以得到有效信息 $I(P; U)$ 为：

$$I(P; U) = -K \sum_{i=1}^{i=n} u_i p_i \log p_i$$

其中， $u \geq 0$ ， $\sum p_i = 1$ ， K 的意义是与选用的信息单位有关的常数，如取以 2 为底的对数时，单位为比特，则 $K = 1$ 。

当系统对所有事件有效性与间的差别可以忽略不计， $u_i = u$ (对所有 i)，则

$$I(P; U) = -Ku \sum_{i=1}^n p_i \log p_i = uH$$

① M. Belis, S. Guiasu, A Quantitative-Qualitative Measure of Information in Cybernetic Systems, IEEE Trans. Information Theory IT-14, 1968。

表示这时的有效信息是不考虑有效性熵函数的 u 倍。当有效性都是1个单位, 即 $u = u_i = 1$ (对所有 i), 则

$$I(P; U) = I(P) = H$$

表示还原为申农的负熵, 申农的信息是有效信息的特殊情况。

后来, 1971年高艾斯和皮卡德 (Picard) 把贝里斯和高艾斯二人所提出的“量一质”统一量度信息称为“有效信息”。1978年夏尔马 (Sharma) 等人又把它推广为“广义有效信息”。^①

1977年加拿大的詹马利 (G. Jumarie) 研究了相对信息, 他把信息与产生信息的信源和使用信息的观察者作为统一的对象来考虑, 三者相互联系, 相互制约。他认为, 对于给定的某个实际总体 U (它可以是生物总体、社会总体、语言学总体……), 给定的观察者 R , 给定了观察者 R 的一个系统 $(S | R)$, 这一系统是总体 U 的某个子集, 系统 $(S | R)$ 同它的环境 $(\bar{S} | S)$ 交换信息, 可以由四个变量来描述:

内熵 $H_i(S | R)$ —— R 拥有的关于 S 的内部结构的信息量;

外熵 $H_e(S | R)$ —— S 拥有的关于它的环境 $(\bar{S} | S)$ 的内部结构的信息量, 它具有相对论中的时间性质;

目标 $V(S | R)$ ——系统希望执行的目标;

变换势 $W(S | R)$ ——信息在系统内转换的效率。

所有这四个变量都是相对的, 因为它们都依赖于观察者 R , 随着观察者 R 的变化而变化。这四个变量类似于相对论中的时空变量, 因此可以对它们施行洛伦兹变换, 由这个变换就能得到对另一观察者 R' 的相对信息:

内相对信息 $I_i(S | R | R')$ ——由 R 提供给 R' 的关于 S 的内部

① 参看王鼎昌:《“量一质”信息与控制论系统》, 载《信息与控制》1981年第1期, 第1、5—6页。

结构信息。

外相对信息 I_0 。(S | R | R')——由R提供给R'的关于S的外部结构的信息。

同样可以施行多次变换，从而得到多级相对信息^①。詹马利还认为，在一定条件下，申农信息是相对信息的特殊情况，而且模糊信息也可以看作是相对信息的特例。这样相对信息概念就可能为语义信息和主观信息（它们随观察者不同而不同）的研究提供一种方法。

上述关于研究有效信息（相对信息）的两种方法，涉及到对信息的效用、价值如何衡量，它与信源、信宿的关系如何？用哲学的语言说，它与主体和客体的关系怎样？随着信息论研究的进展与信息科学的提出，也产生了不同的看法。

第一种看法，认为信息的价值是客观事物本身具有的，信息价值就是“广义的负熵”，应与观测者的感受相区别。

1949年布里渊在《生命、热力学和控制论》一文中指出：“如果我们采取目前的观点，‘价值就意味着广义的负熵’。”他以光为例说：“比较一下两束颜色不同的光，人眼、紫外光电池或红外接收器会给出完全不同的答案。可是，关于每束光的熵，都能精确地给以定义，能正确地计算出来，并能用实验测得。”^②因此，他提出要把信息的绝对的固有的价值和接受者吸收光谱加以区分，他认为这样就有可能“发现一些准则，并依靠它们，把广义熵的定义应用于‘信息’之上，并把它同观测者的特殊感受性区分开来。”

① 参看钟义信：《信息的现状与未来》，载《北京邮电学院学报》1981年第1期，第72—73页。

② 布里渊：《生命、热力学和控制论》，载《控制论哲学问题译文集》第一辑，第169页。

第二种看法，认为信息的价值既取决于主观因素也取决于客体本身。

苏联的茹科夫1963年在《从列宁的反映论来看信息》一文中指出：“为了考虑生物界信息的意义，我们利用信息价值这概念，它是用两个重要的因素来描述的。对于人的信息来说，第一个因素，即主观因素是主体对这种信息的感知训练到了何种程度。……第二种因素，即客观因素是消息本身具有的不同的社会意义。”^①

捷克的斯麦泰西克 (V. Smetacek) 1979年在《信息和通信》一文中也谈到这一问题，他认为某种通信的信息价值不仅在于通信本身的作用，而且还在于有关生命系统的多种需要、目的、期望和可能性。同一通信的信息价值在这些系统内可以是不同的，从而提出构成信息的概念至少要考虑两类现象：

1. 构成信息价值（信息效果）的潜能 (Information potential)，这种潜能是通信本身固有的、是客观的。

2. 通信系统、智能系统本身的作用，这种作用因系统的不同而有所区别。^②

这就是说，某些信息的信息价值由两个方面的因素所决定：

（1）客观因素，即信息本身固有的价值；（2）主观因素的作用，如智能系统对信息的使用等等。

第三种看法，认为信息的价值只与使用者（系统）本身有关。

贝里斯和高艾斯提出的“有效信息”，所考虑的是信息使用

① 茹科夫：《从列宁的反映论来看信息》，《外国自然科学哲学资料选辑》第四辑，第272页。

② V. Smetacek, Information and Communication, Information Processing and Management, Vol 15, No4, 1979.

者的主观方面，是由使用信息的系统本身的特征来决定的，同样的信息对不同的使用系统有不同的意义。例如，电机车的控制，电流表指针所表达的信息，对于掌握电机车的运行速度、运行是否正常、有无故障曾经具有很大的意义。但在最新型的自动控制的电机车里，系统由内部逻辑电路控制，它可以自动选出最佳速度，自行变速。由于系统内部结构的变化，电流表指针的摆动作为控制机车运行的信息意义已经不大了。这是由于信息的使用系统内部结构的变化而引起的信息效用大小的变化。信息使用者的这种主观特征并不是随意性，而是根据系统的不同、目标的变化、系统内部结构的变化等因素决定的，并不一定指系统的精神因素，而只是在生物的心理反映形式中，主观特征一般才指的是观念、意识之类的东西。^①

近年来关于信息的效用问题的探讨，虽有所进展，但仅仅是开始，还远未完成，有待信息工作者的进一步努力。

关于模糊信息的研究

客观世界中的事物是多种多样的，有些事物的特征明显，可以有明确的界限，而很多事物的界限则是不分明的、模糊不清的，这在上一篇关于模糊控制的介绍中已经提到。恩格斯早就指出：「绝对分明的和固定不变的界限」是和进化论不相容的……‘非此即彼！’是愈来愈不够了……除了‘非此即彼！’，又在适当的地方承认‘亦此亦彼！’……”^②。例如，一年四季：“春、夏、秋、冬”之间；时间的划分：“早晨、上午、下午、晚上、夜里”之间，“过去、现在、未来”之间，没有什么严格的明确界限，它们之间不存在不可逾越的鸿沟。由于这类事物的界限是

① 参看王鼎昌：《“量—质”信息与控制论系统》，载《信息与控制》1981年第1期，第8页。

② 《马克思恩格斯选集》第3卷，第535页。

模糊的、不确定的，所以关于这类事物的信息，就叫做模糊信息，所谓模糊信息就是指现实世界中的一类事物的信息，从属于此类到不属于此类的界限是渐近的、模糊的、不确定的。即指消息本身含义的模糊不确定性所引入的信息称为模糊信息。显然在模糊控制中所使用的就是模糊信息。

进入本世纪60到70年代，随着系统科学研究的进展，人们所研究的领域已经进入复杂系统、大系统、超大系统，如航天系统、人脑系统、社会经济系统、智能系统等方面。这类系统不仅结构与功能复杂，涉及大量的参数与变量，而且内部关系非常错综复杂，具有模糊性。尤其是复杂的大系统更具有这一突出特点。如人脑的控制作用就具有模糊性。当我们拿起一只杯子时，并不需要精确地计算究竟要用多大的力量，只要通过触觉、视觉、经过多次反馈和调整，就能以恰如其分的力量握住杯子，既不会因用力太小使杯子落地，也不会因用力过猛将杯子捏碎，如要让机器人来实现这一动作，则要困难得多，我们需要给出精确的数据，因为只有精确的指令，才能使机器人完成这一动作。

申农理论所定量描述的信息是概率信息，概率信息对应的不定性是由事件的概率性质引起的，即它的不确定性与事件的随机性，即事件是否发生有关。概率是由普通集合（即经典集合）来定义的。对于信源发出的信息本身含义具有模糊性质来说，用普通集合是无法处理的。查德提出的模糊集合理论与模糊数学提供了一种新的工具，它导致了对模糊信息的研究。所以就把建立在模糊集合论基础上，研究由于消息本身含义的模糊不确定性所引入的信息叫做模糊信息。

模糊信息在实际生活中是大量存在的，比如，在日常语言中常用的：高、矮、轻、重、老、少、大概、几乎、差不多……等等。这些信息本身含义就是模糊的，所以模糊信息是由事件本身的模糊度的性质引起的，而模糊度则由模糊集合的测度来定义。

模糊集合、模糊数学为模糊信息的处理提供了一种有效的数学模型。关于模糊集合与模糊数学的概念，在第一篇中已作简略的介绍，这里只指出，几乎从模糊集合论一提出，它就已经用于模糊信息处理上了。如前所述，1965年查德发表了《模糊集合》的论文，提出了模糊集合的概念。1968年查德在另一篇论文《通信：模糊算法》中提出模糊数学可以用于信息处理。他说：“所要介绍的概念在性质上虽然是模糊的，而不是精确的，但最终将证明它在很多问题，例如信息处理，控制，系统辨识，人工智能，或更一般地说，在包含不完全或不肯定的数据的决策过程中都是有用的。”以后，不少学者对模糊信息继续进行了一些研究。1972年意大利的德路卡（A. Deluca）等发表了《在模糊集合论基础上的非概率熵定义》一文，研究了纯模糊性所引入的不定性，将申农概率熵的概念移植到模糊集合上，建立了在模糊集合上的非概率的模糊熵定义。1978年奥柯达（Ocuda）等将模糊集合论和统计决策应用到查德所定义的模糊事件，具体建立了模糊决策问题，定义了模糊事件的“熵”，模糊信息价值和信息量。^① 1979年艾什克瓦（Ishikawa）和米诺（Mieno）也定义了“模糊熵”，它不仅包含经典熵的概念，也包含人的独断性和情感的判断，并将这个定义和概念应用于模式识别问题——图章印记问题。

在我国，也有人对模糊信息进行研究，提出了广义信息论和广义信息源和广义熵问题^②。广义信源往往既是随机的，又是模糊的，具有双重不定性，比如要研究模糊事件是否发生，它既要考虑事件本身含义模糊性上的不定性，同时又要考虑事件（模糊）

① 参看《与利用模糊事件的概率测度的模糊信息有关的模糊决策问题》，载《信息与控制》，1978年，第37卷。

② 参看吴伟陵：《广义信息源与广义熵》，载《北京邮电学院学报》1982年第1期，第29—41页。

是否发生的随机性上的不定性，所以无论是从单一的随机性或是单一的模糊性都不能对其进行全面刻划，所以只有同时考虑随机性、模糊性两方面的不确定性才是比较恰当的。这种具有随机性和模糊性的双重不定性的信源称广义信源，其熵称广义熵，它包括两部分：一部分是申农的概率熵，表达信源的随机性；另一部分是模糊熵，表达信源的模糊性。所以刻划广义熵要用两套数学工具，即概率论与模糊数学。

在模糊集合、模糊数学基础上建立起来的模糊信息和模糊熵以及模糊决策等问题，目前正处于发展的初期，许多定义和概念并不统一。因此，要建立系统的模糊信息论，还需要进行大量的工作，需要不断的努力。

70年代所提出的信息科学，虽然有所进展，但严格说来，还不够完善，还没有形成一个体系。首先是由于人们对信息的概念和定义以及信息科学所研究的范围和内容，还没有一致或比较一致的看法；其次，关于信息的实质涉及哲学问题，也有不同的理解，它还是哲学界争论的一个问题；第三，关于信息的度量问题，在语义（意义）及语用（效用）方面以及模糊信息方面，还远未解决；第四，信息科学作为一门新兴学科，它的理论还远不够成熟与完整，还没有形成系统的科学理论体系。但是，展望未来，信息科学将是一门很有发展前途的学科，由于信息科学所涉及的领域是多方面的，因此，要建立一套系统的完整的科学理论，对人类活动各个领域所遇到的信息问题作出正确回答，其任务将是十分艰巨的，然而却是十分有意义的。

第九章 信息论与信息科学的应用

随着近代科学技术的发展，信息概念、信息的基本理论以及信息加工处理技术等方面，已经广泛渗入并应用到各个领域，如控制论、系统工程、生物学、医学、经济管理、图书情报工作等等。这就进一步推动了这些学科的发展，并且在相互渗透、相互结合的基础上，形成了一些新的边缘学科，如仿生学、人工智能等等。

第一节 信息论与控制论

控制论按照维纳所下的经典定义是：关于动物和机器中控制和通讯的科学。控制离不开信息，无论是机器或是动物控制系统，其共同的特点在于，它不是从物质和能量方面，而是着重从信息方面研究控制系统的功能，因此研究信息传递和变换规律的信息论乃是控制论的基础。关于这一点，我们在上一篇中已经反复强调过。

在上一篇的二章三节中，我们从控制论的角度指出了控制系统也是一个信息系统。控制论所说的反馈是着重于信息的反馈，即我们所称作的信息反馈。事实上，反馈虽是控制论系统的关键环节，但除此以外，还应该看到，控制的全过程都是离不开信息过程的。在这个更为广泛的意义上，我们才能进一步理解信息论作为控制论的理论基础的含义。

以上是问题的一个方面，另一方面，我们还要看到信息论是如何运用于控制论的。说得具体些，信息论在工程技术方面应用的结果也形成了一些分支，例如信号理论、编码理论、检测判决与估计理论、噪声理论、滤波器理论、抗干扰理论、图象识别理论，等等。以简单的控制论系统为例，当系统的输出偏离了预定值，敏感元件发出相应的信号，其中已经混杂进噪声的干扰。通过检测判决或估计和滤波才能使误差为最小，以便从中提出有用的信息，同时，为了识别系统的状态，还必须进行系统辨识。其中包括结构辨识、参量辨识、图象辨识，等等。所有这些技术步骤都与信息的接收、估计、滤波和识别等等有关。信息论和有关的这些分支学科都分别应用于自动控制中，具体表现了信息论作为控制论的理论基础。尤其在现代控制理论与大系统理论中对于复杂系统（如各种自组织系统）的分析研究中，在其中应用计算机系统的过程中，信息论更显示其重要的地位与作用。

再如，生物控制论，它着重从生物系统的控制过程和信息处理研究生命现象的本质。生命不仅是有机体的新陈代谢，而且具有信息调节的特点。生物控制论也是仿生学研究的理论基础之一。在本书的第一篇中已经指出，仿生学是60年代发展起来的一门属于生物科学与技术科学之间的边缘学科。它与生物控制论有着共同的特点，都是将机器与生物进行类比。仿生学研究的是生物系统的结构性质、能量转换和信息过程，并将所获得的知识用来改造现有的或者创造新的机械、仪器或工艺过程，从而达到模拟人与动物某些感觉或控制功能的目的。

信息科学与仿生学也有密切的关系。生物界在漫长的进化过程中，由于外界环境及内部机体的相互作用，其最突出的结果是机体对信息感受和处理能力的提高，因此，仿生学的主流是“信息仿生学”。从信息论的观点来看，仿生学的目的是模拟生物控制系统的信息感受和处理的能力，用以改进现有的和创造新的工

程技术系统，为人类服务。

令人讨厌的苍蝇和宏伟的航天事业似乎风马牛不相及，但仿生学却把它们紧密地联系在一起了。苍蝇有惊人的嗅觉，能在很远的距离上发现微乎其微的气味。苍蝇的触角上有嗅觉感受器，每个感受器有上百个神经元，各种化学物质的蒸汽作用于苍蝇的触角，就会产生不同的电信号，并通过神经系统传入蝇脑。此外，苍蝇还有味觉感受器，在苍蝇的口器上长着化学感觉茸毛，在苍蝇的腿上也布满了这种茸毛。每根茸毛由四个感受细胞构成：一个感水细胞，一个感糖细胞和两个感盐细胞。这些感觉茸毛只要与化学物质一接触，便能产生神经信号，把所得到的信息传入脑子。这样，苍蝇就能对接触到的物质进行快速分析，一触即知是否可食。

科学家们在研究了苍蝇嗅觉器官的生物化学本性和化学反应转变为电脉冲的方式以后，已制成十分灵敏的小型气体分析仪。这种仪器现已装置在航天飞船的座舱里，用来分析其中的气体，同时，它也可以用来测量潜水艇和矿井里的有毒气体，以便及时发出警报。^①

又如，在昆虫体内存在一种能传递信息的化学物质，简称信息化合物或信息素，它是一种挥发性物质，由昆虫分泌到体外，向同种昆虫传递信息。信息素的种类很多，如性信息素、集合信息素、报警信息素等。目前对性信息素研究最多，现已发现最少有250种昆虫能分泌性信息素。性信息素是雌虫腹部末端的一个腺体产生的物质，释放出来后，随空气流动扩散。雄虫的触角感受到这种信息素的刺激，就会产生感应而去寻找雌虫，在几十米、几百米，甚至远在几公里以外的雄虫都会被引诱而来。根据

^① 参看王书荣：《自然的启示》，上海科学技术出版社1978年版，第91—92页。

这一特点可以用性信息素防治害虫。现在已经能够用人工方法合成40多种性信息素，一些工业发达的国家已把这些人工合成的性信息素商品化，供防治害虫使用。

第二节 信息论与分子生物学、医学

生物学是研究生物结构、功能、发生和发展规律的科学，自50年代以来，由于在生物学领域中广泛深入地应用化学和物理学上的新成就，生物学的发展非常迅速，人们对生命现象的研究，已经从整体深入到细胞、亚细胞、分子水平和量子水平，出现了分子生物学和量子生物学。分子生物学是指在分子水平上研究生命现象的科学，主要是对蛋白质和核酸等生物大分子的结构和功能进行研究，以揭示生命现象的本质。

生物大分子是指分子量较大，结构比较复杂的分子，蛋白质和核酸等生物大分子通常由几千甚至几十万个原子组成，分子量由几万一直到几百万以上。蛋白质和核酸的结构虽然复杂，但它们的基本结构单位并不复杂，都是氨基酸，只是排列次序和结构方式不同而已。核酸的基本结构单位是核苷酸，由碱基、糖和磷酸三部分组成。碱基主要有四种(即所谓A, G, C, T)，构成不同的核苷酸，核酸又由于所含的糖不同，而分成核糖核酸和脱氧核糖核酸两大类，通常简称为RNA和DNA。

近些年来，在分子生物学领域内对遗传信息的研究取得了重大进展，这些进展可以用信息的理论加以解释和说明，可以说，信息理论对生物科学领域中的某些研究工作起了一定的推动作用。

现在已经广泛承认，生物体的遗传特征由脱氧核糖核酸决定，脱氧核糖核酸(DNA)是遗传信息的物质载体，遗传信息存贮在

脱氧核糖核酸的结构中,DNA有2个螺旋形结构,每个螺旋形结构由一系列核苷酸构成,每个核苷酸又包含1个磷酸分子、1个脱氧核糖分子以及4种碱基中的1种碱基分子。其中关键是碱基。四种碱基为:腺嘌呤(A),鸟嘌呤(G),胸腺嘧啶(T),胞嘧啶(C)。这4种碱基就是将遗传信息编译成“密码”的4个“字母”,遗传密码是3联码(即每个“密码子”由3个字母组成)。如某个脱氧核糖核酸螺旋形结构中的碱基序列可能是:

.....T, GCA, ATT, ACC.....

这种由不同的碱基排列顺序组成的核苷酸系列就组成不同的DNA结构,遗传密码就是记载在亲代DNA分子核苷酸顺序上的遗传信息,DNA分子中特定的核苷酸排列顺序就决定了生物体的遗传性状。DNA遗传密码通过转录成为RNA(核糖核酸)密码,RNA通过转译,把核苷酸顺序解读为蛋白质的氨基酸顺序。在遗传信息的指挥下,生物能合成各种各样的蛋白质,细菌细胞内的蛋白质大约有500—1000种,人体细胞内的蛋白质就有1000种以上。

我们可以把DNA→RNA叫做转录,把RNA→蛋白质叫做翻译。遗传信息经DNA→RNA→蛋白质的表达过程称为信息传递的中心法则。

DNA中碱基系列排列的正确与否是遗传信息能否正确表达的关键,这些“密码子”的任何微小变化,往往会引起严重的后果。在遗传信息的表达、传递过程中,如果有干扰,就可能导致组织畸变。这一情况,从信息论的角度看,类似通信系统中的噪声干扰。如由于X射线辐射的干扰,使细胞在复制、转录过程中会引起变异,有可能使某种碱基被其他碱基代换,改变DNA的结构,使遗传信息发生变异,从而导致组织的畸变,产生遗传性的疾病。

认识生物的目的就是利用和改造生物,造福人类。多年来,

人们一直希望用改造生物“施工蓝图”的方法来改造生物,这就是近年来发展起来的分子生物学的新方向——生物工程。所谓生物工程,就是在工程学领域应用基因操作、细胞融合、细胞培养以及生物反应等生物技术的总称。基因操作,就是用人工方法把不同生物的基因(即载有遗传信息的脱氧核糖核酸分子)从生物体内取出来,在体外进行切割,彼此搭配,再放到生物体内,使遗传特性重新组合,创造出新的生物类型。这也叫做遗传工程。尽管生物工程是一个新兴的技术领域,历史还很短,但影响十分深远,它对工业、农业和医学的发展将起很大的推动作用。

生物工程在工业上应用相当广泛,如可以用遗传工程方法获得一些特殊细菌,用于环境保护、海水淡化、节约能源、冶炼金属以及从废料中回收贵金属等众多领域。

农业是生物工程极有应用前途的领域。科学家们预言,生物工程应用于农业,将解决全世界的粮食问题。如通过遗传工程培育的作物不仅最终可能在盐碱地、在高寒和炎热的气候条件下生长并获得丰收,还可缩短生长周期,同时还能在原先不能生长作物的地方进行农业生产。

在医学领域,利用生物工程,不仅能大量廉价生产各种激素、疫苗和抗体,还能治疗遗传疾病。遗传工程也将成为治疗当前重大疾病问题的有效途径,如在白痴病人中,有一半人是由于缺少一种称为半乳糖苷酶的物质所引起的,通常认为是不治之症。现在,科学家们利用生物工程技术把大肠杆菌的能分解半乳糖的基因切下来,然后通过噬菌体栽入病人的成纤维细胞中,几天后,成纤维细胞中就出现了这种基因。

医学是研究人的生命活动的本质、研究疾病发生发展的规律、研究如何诊断疾病和防治疾病以保护和增进人类健康的科学。近30年来,在现代科学技术的推动下,分子生物学的成就,控制论和信息论在医学上的应用,使现代医学出现了一个迅速发展

展的新局面。

一个有生命的体系，可以看作是由相互联系、相互作用的各个部件组成的复杂系统。在正常的生命机体中，其中任一部件都是以一定的组织性（有序性）、多样性（复杂性）处于一定的稳定状态，并且通过相互作用、相互调节，以保持系统的稳定。而在病态的有机体中，某个部件出了毛病，则表明它的有序性、复杂性发生某种程度的变化，破坏了自身及系统的稳定状态。运用信息论的观点，对有机体的生命活动过程进行定量描述，可以使我们从量与质的统一方面，进一步认识生命的本质。信息理论研究工作者们，提出了用信息熵作为系统的多样性与组织性的量度，并引用来研究生命现象。在生命机体中，信息熵（ H ）函数标志着系统组织结构复杂的有序性的状态。一个有生命的物体是一个与外界有物质、能量和信息交换的开放系统，在正常的生理过程中，机体由于新陈代谢的作用，使机体内部有序结构不断遭到破坏，信息熵就增加；与此同时，机体又不断从外界接收信息（负熵），在机体内部合成高度的有序结构，使信息熵降低，所以，从信息论的观点看，有机体生命活动的实质，就是不断地从外界接收和吸收信息，以引起并维持其生命活动。

运用信息理论来分析生命系统，也可以把生命系统看作是传递与接收信息的调节控制系统。生命系统中各部分之间的相互影响、相互作用可以看作是信息的传递；而生命过程中的调节、控制与适应性的机制，也可以看作是系统对信息的接收、存贮、处理与输出的问题。

在正常的有机体中，机体内的信息传输系统具有足够的可靠性，使得输入系统发送出的信息与接收端接收到的信息之间，有着一一对应关系。当疾病以及其他外界因素影响了有机体的调节机制，有机体的正常状态受到破坏，信息的传递将受到噪声的干扰，而噪声使得接收的消息相对于发送消息来讲，增加了不可靠

性。信息理论的研究，可以对机体在上述情况下的信息关系作定量描述，以确定系统的抗干扰的能力，从而对疾病的轻重程度，机体的愈合能力作出数量上的划分。但是，由于生命机体毕竟是十分复杂的系统，我们在应用信息理论的观点和方法研究生命规律时，要考虑生命现象本身固有的特点，不可简单地、机械地搬用^①。

应用信息理论研究中医，特别是用来探讨针灸疗法也取得了可喜的进展。有人提出，针灸是一种信息疗法^②。用信息调节的观点研究经络学说，经络可以看作是信息的传输系统，“气血”是信息及其载体，经脉络脉是信息通道，穴位是信息的输入端或输出端。经络“内属于脏腑，外络于肢节”，把人体的脏腑百骸联系起来，形成整体的信息传输、控制和调节系统，具有“运行气血，沟通表里，协调阴阳，平衡虚实”，“决生死处百病”等生理功能，针灸和针麻都属于信息疗法，都是以向人体输入信息作为治疗和麻醉的手段。针灸是用各种刺激手段（相应于不同的信息编码），向人体输入信息，伴随一点点能量，作为信息的载体，针灸所刺激的穴位是选取最优的信息输入点（经络反应最强烈的穴位），向失调的经络输入负反馈信息，恢复和促进人的机体的经络调节作用，使机体恢复健康。

在疾病的诊断中，尝试应用模糊信息方法，使诊断的准确性有所提高。任何疾病都要产生疾病信息，而模糊的疾病信息在医学中，尤其在诊断学中是普遍存在的，如血沉快，心率慢，胆固醇高，血压低等，都是不明确的模糊的疾病信息。因此就给医学工作者提出了应用信息与模糊方法来探索和诊断疾病的问题。目

① 参看胡长安：《医学信息论引》，湖北人民出版社1981年，第1—4页。

② 参看任公越：《信息疗法》，载《哲学研究》1980年第12期，第43页。

前国内也有些人进行这方面的研究。

第三节 信息论与管理科学

工业企业可以看成是一个有许多子系统组成的复杂大系统。企业的管理系统由三部分组成，即管理对象（物流），管理机构（厂部及其科室、车间、工段）和管理信息系统（信息流）。如果说物流是企业的主体，那么信息流就成为企业的神经网络，而企业管理机构好比是人体的大脑。大脑的机制与功能离不开神经网络，而企业的管理工作则离不开信息流。因此信息与管理科学非常密切，要改善企业的管理工作和实现管理现代化，必须对企业的信息活动进行科学的分析和组织，企业要有现代化的管理信息系统，所以正确认识信息与管理科学的关系对于实现企业管理的现代化具有十分重要的意义。

信息是管理工作的基础

一个企业，它的管理职能是多方面的，管理活动的内容和形式也是多种多样的。如生产管理、质量管理、财务管理、物资技术供应管理、劳动管理等等，其中最关键的管理职能是：计划、组织、调节（包括统计和控制）。计划是指制定和抉择管理的决策活动。组织的主要使命是使业务系统的全部活动和一切环节达到协调一致，尽一切可能为达到既定目标和实现计划而创造条件。调节的任务在于控制干扰的影响，尽可能地清除偏差和保证系统按预定的进程进展。

企业为了完成既定目标，执行上述职能就不能没有信息。尤其是在现代化的大生产中，企业的规模日益扩大，分工日益精细，企业内部和企业之间的联系交往越来越复杂，企业中存在的信息量是大量的、庞杂的，对这些汪洋大海一般的信息，如果不

作准确的综合分析，以最迅速、最有效的形式向企业各级管理人员提供必要的信息，企业管理职能就无法进行，那末，也就无法对企业生产经营活动进行合理的管理和控制，企业的经营管理工作就搞不好。

我们可以从制定计划的过程中看到这一点。计划是企业行动的基础，如果计划是低劣的、不正确的，那末整个企业的管理活动将是盲目的。因此，一个企业在制定计划，作出决策前，必须要及时、准确地取得信息。如果信息不能及时反映到管理的决策部门，则作出的决策是“事后诸葛亮”，就没有作用。如果信息不准确，就不可能保证决策者作出正确判断，制定出正确计划，即使制定出计划来，这种计划只能对实践起破坏作用，造成经济活动的混乱。

现代化的企业中存在着大量的各种各样的信息，因此管理人员必须要取得有效的、适用的信息，要取得与本部门工作有关的主要数据，如果管理人员只是阅读大量的、无关紧要的资料，则势必浪费时间、劳而无功、贻误时机，造成损失。此外管理人员在加工处理信息时，还必须考虑其经济效果。

现代化企业管理对信息的要求，可以归结为及时、准确、适用、经济。管理水平的提高，在很大程度上取决于信息的质量。所以，从信息论的角度看，管理过程实质是信息过程，信息是企业的基础。

现代化管理系统必须具有信息系统的功能^①

现代化的企业是一个复杂的大系统。在整个系统的生产经营活动中贯穿着两种“流动”，一种是人力、物力、财力的流动；另一种是随之产生的大量数据、资料、指标、图纸、报表等信息

^① 参看寺野寿郎：《系统工程学》，机械工业出版社1980年版，第195页。

的流动。前一种流动是企业生产经营活动的主体流程，这种流动是否畅通，在很大程度上决定着企业生产经营活动的好坏。为了使企业经营达到最优效果，就必须对人流、物流、财流加以科学地计划、组织和调节，使其按照一定的规律运动，而人流、物流、财流畅通的前提条件是信息流的畅通。信息流的任何阻塞都会使人流、物流、财流造成混乱，有损于企业生产的经济效果。因此，一个现代化的管理系统必须具有信息系统的功能，要能够对企业内部和外部的信息进行完整的收集、正确的加工、迅速的传递，以及有效的使用等等，以保证信息流的畅通。

首先是原始信息的收集，这是基础。信息的质量很大程度上取决于原始信息的完整性和真实性。电子计算机应用中有句话：

“输进去的是垃圾（指不完整、不真实的信息），输出来的还是垃圾。”

信息的加工则要求对信息进行分析、比较、选择、计算等等，通过正确的加工，使其成为符合一定管理决策所必需的信息。

信息传输形成了企业的信息流，要求及时、迅速，如果渠道不通，传输失灵，就会造成极大的损失，因此，必须要有一定的措施、机构、办法，以保证信息流的畅通。

信息加工后，有的立即可以使用，有的则需要存贮，以备日后参考。为了以后查找方便就必须拟定一套科学的、方便的查找方法和手段，这种方法和手段叫做信息的检索。

总之，现代化的管理系统必须具有信息系统的功能，能够获取、传递、加工、存贮和使用信息。

信息反馈是现代化管理系统中非常重要的手段^①

现代化的管理系统也是一个控制系统，而任何控制系统的一

^① 参看翟立林：《现代化科学管理概论》，上海人民出版社1980年版，第9—10页。

个基本要求就是信息反馈。信息反馈是现代化管理系统中非常重要的手段。没有良好的信息反馈系统，企业就无法对自己的各项活动进行有效地控制。企业为了达到既定的经营目标，管理人员必须对各方面的工作，包括产量、质量、材料、消耗、机械维修、成本核算等等规定一定的标准。如果实际执行的结果偏离了原定的标准，那就要立即分析原因，采取措施，纠正偏差，进行有效地控制。为此，企业必须建立信息反馈制度。

所谓信息反馈是指把输出的一部分再输送回来，以便同原来规定的标准值或目标值进行对比；及时发现偏差，加以纠正，从而调节输出。例如企业对产品质量的控制，生产过程中的质量控制是保证产品质量好坏的中心环节。为此，企业在生产过程中，必须建立一套质量管理体系，其中质量信息反馈系统是关键。质量信息反馈，是指各环节各工序对前工序发生和流传过来的质量问题，在及时作现场处理和补救的同时，并立即把质量信息发回给前段工序，通知它尽快纠正。质量信息反馈系统包括两个反馈系统：厂内反馈和厂外反馈，厂内反馈是组织企业内部的质量信息反馈；厂外反馈是指用户在使用过程发现的质量问题反馈回企业的设计或制造过程。这些质量反馈的信息是企业改进产品质量的依据。

在管理工作中信息反馈是一个不断循环的过程。这个过程大致可用下图表示：

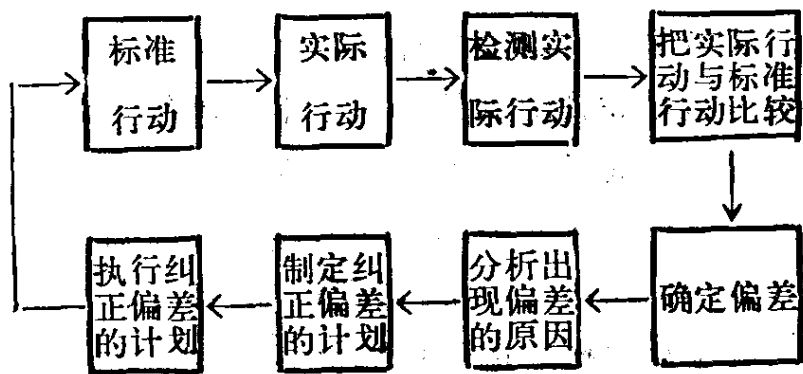


图 9.1 管理系统中的信息反馈框图

这一信息反馈循环过程是川流不息的，每经过一轮循环，企业管理工作的质量就提高一步。因此，信息反馈是现代管理的一个非常重要的手段，是企业达到既定目标的重要保证。

信息反馈虽然是现代化管理的必不可少的手段，但一个管理系统为了能够取得最好的经济效益，最好是在偏差未发生前就能加以纠正，因此仅仅依靠信息反馈系统是远远不够的，但目前多数的管理系统，都是在偏离预期完成情况发生以后，才依靠信息反馈，加以调整，因此企业往往由于发现实际完成情况未达到预期的目标太迟，而使经济上造成一定的损失。为此，一个现代化管理系统必须要利用前馈（feed—Foward）管理，前馈管理乃是通过对输入进行监督并预测其对发生的结果所产生的变异的影响来预见反馈系统的落后，从而可以采取行动以改变输入，并且通过对输出的衡量，从而在输出脱离标准以前就可以发现其可能出现的偏差，这样就可以采取行动改变输入，使系统输出同所要求的预期效果相一致，使企业减少经济损失，取得良好的经营效果。

计算机是处理信息、实现现代化管理的重要工具

过去，企业的组织管理全靠管理人员的经验和能力，信息的处理全靠手抄和人工计算。但是，在生产和科技现代化的今天，尤其是当现代社会进入新的技术革命时代，人们在管理工作中所遇到的是日益增多的、各种各样的信息，对于这些数量庞大，名目繁多的信息，仅靠管理人员的聪明才智或使用大量的人力，进行手工运算，要做到及时掌握充分的信息，迅速准确地作出判断，确定最优方案是非常困难的。由于手工进行处理信息的“生产能力”非常有限，而且不够集中，分散进行，因此对大量复杂的信息处理必然会产生一些缺陷：如速度慢、准确性差、不能发挥信息的综合效用，层次多、机构重叠、浪费人力、物力等。为此，必须使用电子计算机，电子计算机具有容量大、速度快、准确可靠等优点，而且借助电子计算机可以建立统一的信息系统，

即信息计算中心，发挥信息的综合效用，减少层次，节约人力、物力、提高工作效率等等。这种由电子计算机建立起来的新的信息系统，可以及时、准确地给管理人员提供有效的信息，从而使管理人员能够作出正确的决策，选择最优的方案。

电子计算机（“电脑”）是处理信息、实现现代化管理的重要工具，目前在经济发达的国家中，“电脑”（尤其是微电脑）已经广泛应用于国民经济和工农业生产管理等各个领域，电脑已经成为管理现代经济的“神经”中枢。在美国、日本及西欧的许多国家，电脑已成为实现生产自动化、提高效率和质量、降低材料和能源消耗的重要手段。所以建立企业的电子计算机管理系统是企业实现现代化的必然趋势，目前随着新的技术革命的到来，为了实现我国经济管理工作的现代化，必须重视和推广电脑在国民经济各个领域的应用，当然，随着电脑在这些领域的应用，一定会给企业的面目和经济效益带来显著的变化，从而使我国的经济管理工作现代化的水平大大提高。

第四节 信息科学与现代社会

20世纪50年代、60年代，西方发达国家在达到高度工业化后，目前正进入新的技术革命时期（西方有人称为“第三次浪潮”或“第四次产业革命”）。西方有些人认为，这次新的技术革命的特征之一，即社会信息化，西方国家在实现高度工业化后，要从工业社会转入“信息社会”（或叫做知识、智力社会）。

在“信息社会”中，信息成为科技发展的日益重要的资源。过去有人提出，在现代科技发展中，材料、能源、信息是科技发展的三大支柱。而在新的技术革命中，由于社会信息化，电子计算机、自动控制以及生物技术的推广和应用，劳动技能主要不是

靠体力，而是以智力和知识为基础。在这个时代，工作人员既要具有一定的生产经验、劳动技能，更要有智力和知识，并且能不断更新自己的知识，掌握最新的信息。因此要系统地大量生产知识，扩大人们的知识，提高人们的智力，就成为科技发展、生产发展以及经济增长的重要因素。所以西方有些人认为，在信息社会里，价值不是随劳动而增加，是随知识而增加，在“信息社会”中，信息成为日益重要的资源。

在“信息社会”中，整个社会将形成通信网络系统，信息将得到广泛交流和充分利用。由于在通信系统中，采用了电子计算机、微波、光导纤维等新技术，从而扩大了信息的贮存量，并大大加快了信息的传递。例如一根比头发丝还要细的光纤可以传输几万路电话或几千路电视，比电通信的容量大10亿倍。同时，由于人造通讯卫星在信息传递中发挥越来越大的作用，全球通讯网络的建立，人类正进入了全球卫星通信时代，使世界通过信息的联系而形成一个整体，地球缩小成为一个“村庄”。人类在各个领域中获得的信息，可以通过全球通讯网络得到广泛的交流，使信息在各个国家、各个领域中得到充分的利用。

在“信息社会”中，信息业将得到高度发展，甚至将成为一个新的经济成分，登上时代的舞台。在“信息社会”中，由于大量的、日新月异的信息不断向人类社会涌来，信息在社会生活中起着越来越大的作用，成为一种日益重要的资源，而且信息又为人类社会的发展提供了取之不竭、用之不尽的资源，因此信息业有着无限广阔的发展前途。在西方国家，信息工业得到很大发展，从事信息业的工作人员的数量日益增多。据最近研究，美国31种工业中占头三位的是电讯工业、电气和电子设备工业、半导体工业群。1950年，美国只有17%的职工从事信息工作，而现在却有60%的人涉及信息工作。例如程式设计师、职员、秘书、管理人员、政府官员、银行家、工程师、股票经纪人、会计人

员、记者以及某些教师等等。

在“信息社会”中，由于新技术（如微电子技术、光纤通信、生物工程）的使用，信息设备（如电子计算机、微型电脑）的普及，使各种传统的工业自动化程度得到很大提高，农业将得到很大的发展，给社会生产力带来新的飞跃。如现在美国的新闻行业，由于电脑的使用，排版已完全自动化，手工排字已经绝迹。有人预计到21世纪初，钢铁、石油、化工、水泥、电子等基本工业将完全自动化，生产力将得到很大发展，经济效益将达到新的高峰，科学家们预言，生物工程应用于农业将解决全世界的粮食问题。

在“信息社会”中，人们的工作方式、生活方式将发生新的变化。由于社会的信息化，以新的技术突破为标志的社会生产力的高度发展，将给人们的工作方式和生活方式带来新的变化。工业化社会的基础是大规模地成批生产，它要求管理集中化、标准化，工人集中到工厂，孩子集中到学校，病人集中到医院，人口集中到城市，使整个社会随着机器的节奏跳动，同时起床、吃饭、坐车、工作、回家、睡觉，造成了交通拥挤……。而在新的技术革命中，由于广泛使用电脑，生产可以成为一种“非成批生产”，工厂和办公室工作越来越自动化，人们可以分散在家中工作，减少了交通的拥挤以及外出公差等等。这种新的工作方式将带来社会生活的分散化，减少人们的直接接触，家庭将成为工作和其他许多智力活动的基础。

新的技术革命是“在量子电子学、信息论、分子生物学、海洋工程学、核子学、生态学和太空科学的综合科学理论上发展起来的。”^①信息论、信息科学是新的技术革命的基础理论学科、对新的技术革命的发展，无疑将起着推动作用，同时在新的技术

① 阿尔温·托夫勒：《第三次浪潮》，三联书店1983年版，第15页。

革命中，随着社会信息化，信息业的高度发展以及相应的有关通讯技术与信息的加工与处理技术的发展，必然会提出一些新的理论问题，要求信息科学予以指导，信息科学必将随着新的技术革命、“信息社会”的发展而前进，解决一些至今尚未解决的理论与实际问题，使信息科学不断完善，成为一门成熟的学科，从而对各种与信息科学有关的科学领域、生产实践部门起着指导与促进作用。

第十章 信息论与信息科学中的哲学与方法论问题

随着信息论与信息科学研究的进展，它不仅为马克思主义哲学提供了一些新的论证，而且对其发展也提出了一些新的问题：如信息概念是不是哲学范畴？信息的实质是什么？它是物质的，还是精神的？信息与物质、信息与能量、信息与反映、信息与意识的关系如何？马克思主义哲学作为一种科学的世界观与方法论，它与信息方法是什么关系？诸如此类。关于这些方面，哲学界存在着争论，本章将对有关的问题作一些概述与探讨。

第一节 信息概念与哲学范畴

首先考查一下信息的字面含义，牛津字典告诉我们：“信息，就是谈论的事情，新闻和知识。”韦氏字典指出：“信息，就是在观察或研究过程中获得的数据、新闻和知识。”日语《广辞苑》也载明：“信息是所观察事物的知识。”《苏联大百科全书》第二版，对信息概念进行解释，曾把信息看成是新闻工作的一个概念。

如前所述，信息在日常用语中，通常指的是消息、指令、情报、密码、数据、知识等等。长期以来，在通信科学理论没有形成以前，信息这个概念用得不多，即使用，一般被看作消息、新

闻等等的同义语，是人们关于某种事物的知识，它没有被赋予严格的科学定义。

信息作为一个科学概念，最早出现于通信领域。本世纪20年代，哈特莱在探讨信息传输问题时，提出了信息和消息在概念上的差异，信息是包含在消息中的抽象量，消息是具体的，其中载荷着信息。到了40年代，申农和维纳从通信和控制的角提出了信息的概念。此后由于信息概念广泛渗入各门科学领域，而各个学科又有自身的特殊性，因而出现了从各自不同的侧面对信息概念予以各种解释或者给出不同的定义，因此，关于信息的科学定义，目前尚无定论。1973年有人统计，对信息已经发表的定义约有39种之多。现就有关的几种信息概念作一初步介绍：

1.信息是人们对事物了解的不定性的度量，从而把信息看作是不定性的减少或消除。

从通信的角度看，信息就是通信的内容，通信的作用就是消除通信者的某种不定性。什么是不定性？人们如果对客观事物不了解，对其缺乏必要的知识，往往表现出对这些对象的情况的了解是“不清楚的”、“不确定的”，这就可以直观地表述为不定性。如对天体演化、地下矿藏的分布不清楚，对工业生产的状况、农业收获的好坏不了解，对某个问题不能回答，对某件事有疑问，这就表示我们对这类事物的情况不了解，或者有疑问，缺乏知识，存在“不定性”。当人们采用各种方法，使用各种手段，通过天文望远镜的观测，资源卫星发回的照片以及报表中的工农业生产的统计数字，了解到这些事物的有关情况，人们对它们的认识就由不清楚变为较清楚或完全清楚，这种不定性就减少了或消除了。于是我们就说获得了关于那件事物的信息，所以在一些有关通信理论或控制论的著作中，信息就被看作为“不定性的减少”或“不定性的消除”等等。总之，把信息看作是人们获得新的知识，改变原来的知识状态，从而减少或消除了原先的不

定性。

概率论是申农信息理论的数学工具，所谓不定性意味着某件事是否发生有各种可能性，即有发生、不发生或部分发生等等多种可能性，这些可能性可以用概率（P）来计量，因此，从数学的角度看，有人把信息解释为“概率分布的变动”或“概率的增加”。如有人认为，“既然可以把知识编码成为这样的概率分布（即对各种可能性组合成的集合，分配一组概率值），我们就可以给信息下个定义：使概率的分配发生变动的东西”^①。

2. 信息是控制系统进行调节活动时，与外界相互作用、相互交换的内容。

维纳在1950年认为，“信息这个名称的内容就是我们对外界进行调节并使我们的调节为外界所了解时而与外界交换来的东西”。^②

以蜜蜂为例，蜜蜂是一种群体活动的昆虫，它们是具有严密组织的控制系统，并具有较完善的信息联系，它们通过特有的信息交换方式来调节群体的活动，一只侦察蜂从外界获得信息后，就在群体内部按照特有的方式进行传递、交换，使群体内部成员了解、接受，以调节整个群体的活动。当一只侦察蜂发现了蜜源，获得了食物的信息后，立即飞回蜂群，通过舞蹈动作，把这一信息传给工蜂，工蜂接受信息后，立即按照侦察蜂的舞蹈动作所表明的距离、方向去采取花蜜。奥地利学者克·符利士（K. 弗利士）曾进行了如下试验，他把盛有果酱的盘子放在离蜂箱不远的地方观察，开始蜜蜂并未注意，忽然有一只蜜蜂发现了它，就飞去尝了尝，然后飞走了，不一会儿就引来了大批蜜蜂，它们开始了盘

① 迈伦·特赖布斯，爱德华·麦欧文：《能量和信息》，载《摘译——外国自然科学哲学》1974年第2期，第4页。

② 维纳：《人有人的用处》，商务印书馆1978年版，第9页。

子——蜂箱——盘子之间的飞行，直到把盘子里的果酱搬完为止。克·符利士通过试验与观察，发现侦察蜂传递给工蜂的信息是通过舞蹈动作表现出来的。舞蹈的图形和次数的变化表示着蜜源的方向与距离的不同，据统计：

当盘子距离蜂箱100米时，舞蹈9—10次；

当盘子距离蜂箱200米时，舞蹈7次；

当盘子距离蜂箱2公里时，舞蹈4次；

当盘子距离蜂箱6公里时，舞蹈2次。

如果舞蹈方向垂直向上，则表示朝太阳方向飞行；如果舞蹈方向垂直向下，则表示向太阳相反的方向飞行，如果舞蹈有一定的角度，则相应的朝偏离太阳的一定角度的方向飞行。^①

蜜蜂为了采集花蜜，必须调节蜂群的活动，而在采集花蜜，调节群体的活动的过程中，蜜蜂与自然环境以及蜜蜂个体之间需要交换一种东西，以便互相了解，从而达到调节群体活动，采集食物，维持生存的目的，而这种相互交换、相互作用的东西，称之为信息。

作为高等动物的人类及其社会，当然也是一个控制系统，人们通过语言、文字、图象等等彼此交换信息，以调节人类社会的活动。所以信息就是控制系统进行调节活动时，与外界相互联系、相互作用、相互交换的一种内容。

3. 信息作为事物的联系、变化、差异的表现。

艾什比1956年提出的“‘变异度’这一概念，即信息论中所讲‘信息’这一概念。”^②所谓变异度就是指某一集合中元素的差异程度，通俗地讲，就是指事物的变化、差异。当某一集合只

① А.П.Сухайов: «Информация и человек», Москва, «Советская Россия», 1980, стр16—17.

② 艾什比:《控制论导论》，科学出版社1965年版，第152页。

包含同一类元素时，则这一集合是没有差异的。这意味着集合的变异度是0。例如由12个元素组成的集合

c, b, c, a, c, c, a, b, c, b, b, a

若不计各元素在先后次序上的差别，则只包含三个不同的元素a, b, c，这一集合的变异度是3。当集合的变异度以2为底的对数表示时，其单位叫做比特^①。

艾什比在其著作中将信息称为“变异度”，这个名称反映了他对信息是从联系与变异的角度来加以理解的。这种观点在苏联比较普遍，如乌克兰因采夫（Б.С.Украинцев）在1963年曾提出：

“信息是控制过程中物质对象的普遍联系的特殊形式和相互关系的特殊形式。”^②同样的观点在我国也有反映，如有的人曾提出，信息是表征客体的变化或客体之间相互差异或关系的东西^③。

宇宙间的事物，如果是单一的，孤立静止的，其中没有任何差异和变化，那末，它就没有任何信息，也不需要任何信息，宇宙将会处于死一般的寂静状态。然而我们所生活的宇宙是复杂多样的，处于相互联系、相互作用、永不停息的运动变化状态之中，而表征这种联系、变化、差异的就是信息。例如广播电台每天所报导的消息、新闻，它反映了国际形势、国内大事的各种动态，每天都有变化、差异，都有新的内容，才为人们提供了信息。如果第一天所报导的内容，第二天再进行重复，与第一天没

① 参看艾什比：《控制论导论》，科学出版社1965年版，第123—125页。

② 乌克兰因采夫：《信息与反映》，载《外国自然科学哲学资料选辑》第四辑，第238页。

③ 参看蔡长年：《信息论专业学会第三届年会开幕讲话》，载《信息论与沃尔什函数》，中国电子学会信息论专业学会编，1980年，第8页。

有任何差异，没有提供新的东西，当人们再听到它时，就没有获得任何信息。所以，信息必须表现出事物的关系、变化、差异，提供出事物在运动变化过程中出现的新的特征。

4.信息表现了物质和能量在时间、空间上的不均匀的分布。

维纳1948年在《控制论》初版导言中曾说：“消息是分布在时间上可量事件的离散的或连续的序列——确切地说，就是统计学家的所谓时间序列。”^①

冯·诺意曼1958年在《计算机和人脑》一书中提出：“用来传送信息的信息，它的唯一统计性质，就是脉冲的频率（每秒钟的脉冲数），……消息是一种周期性或近似周期性的脉冲序列。”^②

电视台播放的电视图象、广播电台广播的节目，都是由通信系统所发射的电磁波（伴随一定的能量）表现在时间、空间上的一系列的不均匀的分布。由于电磁波和能量在时间、空间上的不均匀分布，我们才能从电视机的荧光屏上看到色彩不同、深浅有别的各种图象，才能从电视机或收音机中听到音调高低不同、速度快慢有别的各种声音，从而给我们送来各种各样的信息。又如电影胶卷、计算机的磁带、磁盘以及电唱机的唱片等等所存贮的信息，也表现为物质和能量在时间和空间上的不均匀的分布。

5.信息是系统的组织程度、有序程度。

维纳在1950年已把信息看作是系统的组织程度。他说：“消息集合所具有的信息则是该集合的组织性的量度。”^③

苏联的茹科夫在1976年出版的《控制论的哲学原理》一书中，引用了维纳的观点，认为“信息——这是组织的一种尺度，

① 维纳：《控制论》第二版，科学出版社1963年版，第8—9页。

② 冯·诺意曼：《计算机和人脑》，商务印书馆1979年版，第58页。

③ 维纳：《人有人的用处》，商务印书馆1978年版，第12页。

是控制系统及其作用的有目的地调整了的结构……”^①

如遗传信息。DNA中储存的信息量非常大，可以使每一个物种中的个体之间都存在着差别，DNA不仅能自我复制，而且能指令细胞合成自身需要的一切蛋白质。蛋白质由20种氨基酸构成，由于它们的结构、排列不同（有序化程度不同），可以给出天文数字的各种组合，从而形成生命所需要的一切蛋白质，并发展进化为不同组织程度的生物有机体。

6. 信息是由物理载体与语义构成的统一体。

克劳斯1961年在《从哲学看控制论》一书中说：“什么是信息呢？纯粹从物理学方面看，信息就是按一定方式排列起来的信号序列。但光说这一点还不足以构成一个定义。毋宁说，信息必须有一定的意义，必须是意义的载体。……由此可见，信息是由物理载体与语义构成的统一整体。”克劳斯又认为信息的意义或语义不可以仅从狭义的语言表达或逻辑关系方面加以了解，他以体育教员教学生上体育课为例，教员的示范动作也具有信息的意义（语义）。他说：“信息的语义能够产生心理效果，只有在这个时候，我们才能说信息有语义。”^②

以上几种不同的观点，是从不同的侧面提出的，都有一定的道理。从哲学的角度分析，第一、二种意见，涉及人这一主体的知识状态，人（或控制系统）与外界的相互作用等方面，从而涉及信息是不是精神的问题；第三、四、五种意见则是从客体本身的关系、变化、差异、组织程度及其在时间、空间的分布状态等方面进行分析，涉及客观物体及其属性方面，涉及信息是否物质的属性问题；而第六种意见，则又从客体与主体两者的结合上来

① 茹科夫：《控制论的哲学原理》，上海译文出版社1981年版，第129页。

② 克劳斯：《从哲学看控制论》，中国社会科学出版社1981年版，第68—69页。

考虑信息，涉及信息与物质、精神关系的问题。因此就这些观点来看，必然涉及信息的实质，信息是物质的？还是精神的？或是物质与意识相结合的某种第三者，从而涉及哲学基本问题。

另一方面，从上面所述的几种信息概念也可以看出，信息概念已广泛渗入许多科学部门，它已不只是信息论、控制论等部门的科学概念，而且也是生物学、医学、心理学以及许多社会科学部门所应用的概念，因此作为信息的概念和定义应该具有很大的普遍性，应该适用于它所涉及的一切领域，从而给哲学界提出了一个问题，信息是否可以作为哲学的一个范畴。对此，目前存在着不同的看法：

一种看法，认为信息不是哲学范畴。这种观点认为，信息是控制论的概念，是生物界、社会、机器中所特有的，虽然信息是物质的一种属性，具有普遍的科学性，但它不是哲学范畴。

另一种看法则认为信息是哲学范畴。这种意见认为信息概念已不仅是信息论、控制论的部门科学概念，也是生物学、医学、心理学以及许多社会科学部门应用的概念。信息是一切物质的属性，它同“时间”、“空间”、“运动”一样，是一个有普遍性的哲学范畴^①。

那么，信息是不是哲学范畴？它是否具有哲学范畴的特征？

所谓哲学范畴，是反映整个物质世界的本质联系的最基本的概念。其主要特点是，由于它是从各门具体科学中抽象和概括出来的，因此，概括性最高，普遍性最大。同时，还由于哲学本身是世界观、方法论，对各门具体科学有指导意义，所以哲学范畴适用范围最广，对各个领域具有方法论意义。

那么，我们现在考查一下，信息作为一个科学概念，是否具有作为哲学范畴的特征？

^① 参看林海：《信息问题简介》，载《国内哲学动态》，1981年第4期。

1. 信息概念是反映物质世界的本质联系的最基本的概念。尽管目前科学界、哲学界对信息概念有不同的看法,从不同的侧面给出各自的定义,但仅就以上所列举的几种来看,信息概念具有联系、关系等本质属性的内涵。在通信领域,信息是两个系统(信源与信宿)之间互相联系的内容,信宿收到信源发出的信息,从而消除不定性。从控制论的角度看,信息是控制系统进行调节活动时,与外界发生相互联系、相互交往内容的名称。而在物理学、生物学、语言学等领域中,把信息看作是系统的组织程度、有序程度(即系统中各个元素、部件之间的一类特定的联系)。从上可以看出,信息概念中所具有的内涵,反映了物质世界的普遍联系、关系的本质特性。

2. 信息概念已经成为自然、社会、思维各个领域的普遍概念,具有很大的普遍性。由于现代科学技术的发展,各门科学的相互渗透、边缘学科的产生以及科学向整体化发展的趋向,原来部门科学中的某些基本概念已向适用于各门科学领域中普遍性概念转化,有成为更为一般化的科学概念的发展趋势,从而表现出其具有更大的普遍性和更高的概括性,显示出具有哲学范畴的特征。同时,从各门具体科学领域的实践中,无论是自然科学或是社会科学,都从各自的角度描述了信息的具体表现形式,有的还把信息概念与哲学的一些基本概念联系起来,用唯物辩证法的某些基本范畴,如联系、关系、变化、差异、特殊性等等加以说明。科学实践的发展说明了,信息概念已经成为自然、社会、思维各个领域中具有很大普遍性的概念,具有哲学范畴的特征。

3. 信息作为一个哲学范畴具有方法论意义。信息方法作为一种研究方法,在各门科学中已经得到广泛应用,尤其是在一些综合性科学领域中更是成为不可少的基本方法。

在分子生物学领域,运用信息的方法对遗传机制进行了研究,可以把DNA→RNA→蛋白质,看作是遗传信息从DNA经过

RNA流向蛋白质的信息流动过程，这一流动过程遵守着信息的编码、传递、变换、存贮的运动规律，从而进一步揭示出生物遗传机制的奥秘。

控制论中类比与功能模拟离不开信息方法，从信息方法考察，类比就是把两种不同性质的系统获取、传递、加工、存贮、使用信息的功能进行类比，找出其对应关系和共同本质，例如把电子计算机和人脑的信息流动过程进行类比，找出其共同本质，从而为利用机器模拟并代替部分人脑的功能提供科学论据。

在社会管理科学方面，从信息方法分析，管理系统可以看作是信息流通系统，管理机构的任务就是通过信息流通系统掌握信息，处理信息，然后作出决策，发出指令，有效地组织和指挥这一系统的各种活动。

可见，信息作为一个哲学范畴，对各门科学具有方法论意义。

4. 信息作为辩证法范畴具有对偶性。信息作为辩证法的基本范畴有其对立的另一方面。早在19世纪波尔兹曼就把信息与熵作为一对对偶范畴提出来了。他指出，熵是一个系统失去“信息”的度量，两者之间存在着相互联系、相互转化的辩证关系。申农在提出著名的信息量公式时，采用了熵这一名称，不过这一信息量公式与统计力学中的熵差一负号，所以维纳把信息称作“负熵”。

“熵”这一概念最早产生于物理学领域，但从现代科学发展的趋势来看，它日益在各个领域得到广泛应用。早在本世纪40年代奥地利物理学家薛定谔就应用热力学中的熵及负熵等概念来解释生命的本质。他在《生命是什么？》这本书中说：“有机体就是赖负熵为生的。或者，更确切地说，新陈代谢中的本质的东西，乃是使有机体成功地消除了当它自身活着的时候不得不产生

全部的熵”。^①可见，薛定谔在解释生命的新陈代谢过程时，从对立统一关系的角度把熵与负熵作为一对对偶范畴而提出来。近30年来，热力学与统计物理学的进一步发展，产生了耗散结构，协同学等理论。耗散结构是客观世界普遍存在的一种现象，耗散结构理论具有很大的普遍性，其中也涉及熵与负熵的相互转化、相互联系的辩证统一关系，目前这一理论正在用来研究化学、生物化学、生态学、生物进化、医学以及社会经济管理系统等方面。可见，“熵”的概念也正在各个领域中得到推广和应用，熵与信息（负熵）的概念是互相对立、互相联系、互相转化、互相补充的。

总之，信息概念反映了物质世界最一般的本质联系，具有很大的普遍性，具有唯物辩证法的基本范畴的对偶性的特征，对自然、社会、思维各个领域具有一般方法论意义，所以把信息概念作为哲学基本范畴的观点，是有一定道理的。

第二节 信息的实质

1948年维纳在《控制论》一书中指出，“机械大脑不能象初期唯物论者所主张的‘如同肝脏分泌胆汁’那样分泌出思想来，也不能象肌肉发出动作那样能以能量的形式发出思想来。信息就是信息，不是物质也不是能量。不承认这一点的唯物论，在今天就不能存在下去。”^②维纳不同意用机械唯物论、庸俗唯物论的观点去理解信息，但却提出了信息就是信息，不是物质也不是能量这一命题，此后不少人同意维纳这一看法，并作了一些论证，他

① 埃尔温·薛定谔：《生命是什么？》，上海人民出版社1973年版，第78页。

② 维纳：《控制论》第二版，科学出版社1963年版，第133页。

们把信息和物质、能量的一些特征作了比较，认为信息与物质、能量有区别，不能等同。

关于信息与物质的区别有以下两点理由：

1.任一具体物体当它转移到别处去后，原来的地方就不再有这一物体了。而信息则不同，当某人把他的知识（指人拥有的关于某种事物的信息）传递出去后，他本人并未把自己具有的知识丢失，因此，对于他本人来说，知识（信息）并未发生因转移而减少或消失，相反，由于在传递过程中反复使用，知识反而更加巩固^①。

2.任一具体物体都具有一定的质量，而信息则不同，它虽然离不开一定的物质载体，需要通过文字、语言、图象等具体物质形式表现出来，但它本身却没有质量^②。

信息的传递离不开能量，能量是传递信息的媒介，但能量不是信息，两者有区别，其理由如下：

（1）信息的内容及其所起的作用不取决于传递信息所消耗的能量，信息的内容取决于信源。信息所起的作用则取决于信息的内容，当然它和信源有关，也与信宿（收信者）的条件有关。例如打一份电报，如字数相同，则所需的能量可以相等，但内容却可以完全不同，电报的作用可以由电报的内容及收信人的情况来决定，而与打电报所消耗的能量无关。

（2）能量可以相互转化，而且是守恒的，信息则不遵守能量守恒定律，常常由于传递过程中所受到的干扰，造成信息的丢失^③。

① 参看罗维斯基等：《机器与思维》，三联书店1963年版，第116页。

② 参看《现代自然科学与马克思主义哲学》，湖南大学马列主义教研室编，1980年，第74页。

③ 参看《现代自然科学与马克思主义哲学》，湖南大学马列主义教研室编，1980年，第75页。

1961年，克劳斯在《从哲学看控制论》一书中，同意维纳的看法，并列出表格，加以比较，说明物质、能量、信息与意识的区别，见下表①：

加以比较的 各个领域的 存在方式	事物、基 本成分 等等	过 程	守恒原理	熵	度 量
物 质	电子，有机 细胞，生产 力等等	扩散过程， 发展过程 等等	存在于物 理领域	结构熵	数目，重 量，数量 单位等等
能 量	能量子， 引力能等 等	能量转化 过程	物理领域 里的守恒 原理	热力学 第二定律	各种不同的 能量度量 (例如， 电度、卡 等等)
信 息	信号，信 号序列等 等	通讯，信 息的存储 等等	没有守恒原 理（因为 $I = I_1 + I_2$ ，+ 噪 音，决不是 守恒原理！）	信息熵（例 如，由于噪 音侵入而出 现的信息 熵）	信息量度量 (例如，根 据申农)
意 识	观念，概 念等等	抽象，逻 辑推理等 等	缺 如	缺 如	缺 如

既然信息不是物质，也不是能量，那么信息究竟是什么呢？维纳没有明确回答，这就涉及信息实质的问题，从而提出信息是物质的？还是精神的？或是某种第三者等各种不同的看法，因此信息实质的问题就成为哲学界争论的一个问题，众说纷纭，意见很不一致，初步归纳大致有以下几种：

1. 信息是物质或物质性的东西。

持这一观点的人认为信息是一种物质或属于物质性的东西，

① 克劳斯：《从哲学看控制论》，中国社会科学出版社1981年版，第61页。

如场或其他的媒介物质。

苏联的别尔格认为有“信息场”存在，他在1971年明确提出“信息场”的概念。他说：“马克思主义哲学家根据列宁的反映论研究了信息过程客观性的概念，……按照这个概念，‘信息场’是客观实在不可分离的部分。确定这个基本事实，是控制论对现代科学世界图景最重要的贡献。”^①他还认为引力场、电场、磁场等都是信息的负载者。

众所周知，场是物质存在的一种形式，场本身具有能量、质量和动量，而且在一定条件下可以和实物相互转化。别尔格认为有“信息场”存在，“信息场”是客观实在不可分离的部分，那么，这里就产生了一系列的问题：“信息场”是不是物质存在的一种形式？它与“信息”的关系是不是如同场与实物的关系，两者之间是否可以相互转化等等。这些问题涉及到对信息实质的看法，即信息是不是一种物质或物质存在的一种形式。对这一问题，别尔格并没有讲清楚。但“信息场”问题的提出有助于开阔思路，有助于对信息实质问题的深入研究与探讨。

此外，还有一种观点，认为信息是主观与客观之间的一种媒介物质，并且认为这一看法可以追溯到公元前4世纪原子论创始人古希腊哲学家德谟克利特。德谟克利特认为，物体的表面分泌出了微细的液粒，这些微细的液粒通过空气影响人的感官，使人得到物体的“意象”。当时，德谟克利特已经正确猜测到，从客观到主观有一种物质作媒介。从信息论的角度看，任何物体都是一个信息的“发射”装置，人体的各种器官是信息的“接收”装置。一个苹果具有形、色、香、味等不同的属性，这些不同的属性分解成不同的物质信息向外发射、扩散，而人则通过各种感觉

① A.别尔格：《控制论的方法论观点》，载《摘译——外国自然科学哲学》1974年第2期，第21—22页。

器官，来接收这些不同的物质信息^①。

2. 信息是一切物质的属性或只是控制系统的功能现象。

1976年，苏联的茹科夫在《控制论的哲学原理》一书中指出，在苏联的各种文献中有关信息实质的问题存在着两种基本观点：一种认为，信息是一切物质的属性，信息概念被解释为具有普遍性的哲学范畴，代表人物为А.Д.乌尔苏尔 (А.Д. Улсул)，Т.П.塔拉先柯 (Т.П. Тарасенко) 等；另一种，则把信息者看作是与控制有机联系着的，只为生物界、社会和工程控制系统所固有的功能现象。在这个意义上，信息概念被看作是控制论的概念，代表人物如П.В.科普宁 (П.В. Копнин)，Б.С.乌克兰因采夫等^②。

上述两种观点中的第一种称之为属性论，第二种称之为功能论。这两种观点都有共同的出发点，都承认信息的客观性，彼此都承认对方是唯物主义的^③。

这两种观点有一定代表性，它的形成与信息论的研究进展有关，一般来说，功能论的观点出现较早，当申农创立信息论时，从通信的角度，信息作为通信的内容，人们收到信息后，知识状态发生改变，减少或消除原先的某种不定性。换言之，在控制论出现以前，信息是表示人关于某种知识的东西^④。即把信息理解为人们在认识世界过程中，彼此交往所取得的或巩固在人们意识中

① 参看钟焕懈：《信息与反映》，载《哲学研究》，1980年第12期，第57页。

② 参看茹科夫：《控制论的哲学原理》，上海译文出版社1981年版，第123—124页。

③ 参看刘伸：《苏联哲学界关于信息概念的争论》，载《国外社会科学》，1980年第7期，第75页。

④ 参看Т.П.塔拉先柯：《关于控制论中“信息”概念的定义》，载《外国自然科学哲学资料选辑》第四辑，第253页。

的知识。随着信息论研究的进展，以及信息论的推广、应用和控制论的出现，使信息的范围扩大到人的意识之外。信息过程不仅为人所固有，而且为一切有生命的物体以及某些人工技术系统所固有，于是就形成了一种独特的看法，信息被看作控制系统的功能。1955年苏联的索波列夫(С.Л.Соболев)就提出，研究信息论是研究控制论的基础^①。1963年乌克兰因采夫指出，“信息是在物质的一定的组织程度上产生的，即在具有控制过程的情形下产生的。信息和控制是一对对偶范畴，缺少其中的任何一个，都不能揭示出另一个。”^②

随着信息概念和信息理论的研究和应用，苏联的一些学者认为不应该限制信息概念的范围，而应该用信息的观点研究自然界中一切物体相互作用的过程。此后许多人从这一立场出发，分析了信息概念，认为应该把信息看作是物质的普遍属性。1960年罗维斯基等就提出：归根到底，信息并不是什么别的东西，它不过是物质的某一特性。^③

由于信息概念和信息理论渗入各个科学部门，人们的认识随之进一步深化，因此一些苏联学者认为信息概念应该包含在具有一般哲学意义的基本概念之中，并且把信息概念与哲学中的反映概念联系起来，进行对比，认为信息概念与辩证唯物主义的反映概念相类似。列宁认为，“假定一切物质都具有在本质上跟感觉相近的特性、反映的特性，这是合乎逻辑的。”^④根据列宁的看

① 参看索波列夫：《控制论的若干基本特征》，载《外国自然科学哲学资料选辑》第四辑，第43页。

② Б.С.乌克兰因采夫：《信息与反映》，载《外国自然科学哲学资料选辑》第四辑，第249页。

③ 罗维斯基等：《机器与思维》，三联书店1963年版，第117页。

④ 列宁：《唯物主义和经验批判主义》，人民出版社1960年版，第81页。

法，反映是物质的普遍属性，而在反映过程中，由于物质系统的相互联系、相互作用，必然要传递、交换信息，因此，物质在其各种水平上，都进行着特有的传递信息的过程，从而出现了属性论的观点，认为不仅在生物、社会、机器中，即使在无机界也存在着信息交换过程^①，信息是一切物质的普遍属性。1963年塔拉先柯提出，产生信息关系的能力不只是生命物质所独具的属性，信息的概念必须进一步扩大，使之一般不局限于生物界，要扩大到整个物质世界，其中包括无机界^②。

A·C·谢尔巴科夫1976年分析了现代科学研究中的材料后指出，不能绝对地否认，在非生物系统中存在着信息流通的机构。在某些复杂的无机系统中，在非生物界，信息控制具有自己的起源^③。

关于信息本质的功能论和属性论的两种看法是否全面，是否完全正确，值得进一步思考和研究。按照功能论的看法，如果信息只与控制系统相联系，仅为生物界、社会和机器控制系统所固有，那末，在生物界出现以前的自然界以及生命现象出现后的无机界有无信息与信息过程？由于科学技术水平的局限，人们认识、控制、利用和改造世界能力的局限，对于那些尚未被认识、控制和利用的物质系统有无信息与信息过程，如太阳系或银河系中的有些尚未被人们认识的星体，它们有无信息与信息过程？此外，从科学实践来看，如果信息只为生物界、人类社会、机器控制系统所固有，那么信息概念、信息的基本理论以及信息方法在物理、化学、地质学等各个领域的推广和应用又如何解释？

① 参看刘仲：《苏联哲学界关于信息概念的争论》，载《国外社会科学》，1980年第7期，第74页。

② 参看T·П·塔拉先柯：《关于控制论中“信息”概念的定义》，载《外国自然科学哲学资料选辑》第四辑，第253—256页。

③ 参看谢尔巴科夫：《无机界形成中的逆向联系和等稳性》，《莫斯科大学学报》哲学版，1976年第3期，第23页。

关于属性论亦需要对一些问题作出回答，虽然认为反映与信息是相互联系的，在反映过程中，物质之间要传递和交换信息，那末，信息与反映的关系究竟如何？两者有无区别？其次，既然认为信息是一切物质具有的普遍属性，那末，它与物质其他的一般属性“时间”、“空间”、“运动”有何区别？

在苏联除了上述两种基本观点外，还有其他的一些观点。有一种观点，基本上接近功能论，但也吸取了属性论的一些看法。如苏沃洛夫(Л. Н. Суворова)认为，信息毫无例外地包含在物质世界的一切系统和要素之中，信息的获取就是揭示客体的有序性，而这种有序性是客观的，与人的意识对它的反映无关。但是，这种观点又认为这只是一种潜在的信息，只有当它们与认识主体相互作用时，才有现实性。所以认为信息是指能够被认识主体所接收的任何系统的有序性，或者说，在物质世界的一切系统中都存在着“潜在”的信息，只有当生命过程出现后，信息的接收与交换才成为可能，并且认为在人类社会中，这种信息的接收与交换才达到了发展的高级阶段^①。

3. 信息不仅是“物质的”，有时也是“观念的”。

茹科夫在《控制论的哲学原理》一书中，一方面把信息与控制系统相联系，同时又把信息分为社会以内和社会以外两种，他认为“社会以外的信息总是客观的，物质的”。而在社会内部，用自然语言和人工语言表达的信息，“严格地说，这样的信息也是客观的，而且符号也是物质的，但是通常认为，单词中所含的语义信息是观念的。”因此，“信息过程往往不仅是物质的，而且也是观念的。”^②在苏联有些持功能论观点的人，认为属于社会

① 参看苏沃洛夫：《唯物主义辩证法》，中国人民大学出版社1985年版，第155页。

② 茹科夫：《控制论的哲学原理》，上海译文出版社1981年版，第139页。

意识形态范围内的社会信息是精神的，如政治、法律、伦理、美学、宗教等信息^①。

保加利亚的杨科夫也有类似的想法，1979年他指出，“信息的某些形式也是存在于意识之外而不依赖于意识，例如遗传信息”，“另一方面，作为人的认识中的最高形式的信息是外界的观念反映。在这种形式中，信息属于意识范围……，因而，某些信息形式是物质的（不是实物的）即存在于意识之外并不依赖于意识，而另一些信息形式则是观念的（存在于意识之中）”。

“对于信息的各种形式，……不论是一般反映，还是一般信息，都不可以只列入物质范围，也不可以只列入意识范围。”^②

在我国，也有人认为，信息是客观内容的主观反映，在生物界以前的反映（指心理反映以外的）形式中和技术系统中一样，这种反映是纯物质的，但在心理反映中，特别是在人的意识中，它不仅是物质的，而且也是观念和精神的^③。

4. 信息是非物质的精神的属性。

持这一观点的人为西德的唯心主义哲学家瓦斯幕特，他认为信息完全是从物质世界中区分出来的，是特殊的、非物质的精神实体的特性^④。

有些为梵蒂冈服务的宗教人士，在信息的实质问题上也持唯心主义的态度，他们认为信息不是以消息为其载体，信息是由上

① 参看刘仲：《苏联哲学界关于信息概念的争论》，载《国外社会科学》，1980年第7期，第75页。

② M.杨科夫：《物质信息与观念信息》，载《自然科学哲学问题》丛刊，1980年第3期，第70—71页。

③ 王鼎昌：《“量—质”信息与控制系统》，载《信息与控制》，1981年第1期，第9页。

④ 转引自罗维斯基等：《机器与思维》，三联书店1963年版，第117页。

帝产生的，似乎只有人的灵魂才可以成为信息的再度继承者^①。

5.信息是与物质、意识并列的，或者由两者融合起来的第三种东西。

1957年哥特哈德·贡泰尔（Gotthard Günther）在《机器的意识、控制论的形而上学》一书中提出，在物质和意识之外，应设定第三种根本的东西，即信息。这第三种根本的东西，既不可完全还原为单纯的客观事物，也不可完全还原为单纯的主观事物^②。

贡泰尔在这里实际上提出了有超越于物质和意识之外的第三种根本东西存在。他认为现实世界存在着独立的三种根本东西，即物质、意识、信息。克劳斯在《从哲学看控制论》这本书中指出，贡泰尔的观点是错误的，克劳斯认为“决没有三种独立不依的实在因素，也从来没有两种独立不依的实在因素”。他并且指出了物质、意识、信息，三者之间存在着下列相互依存关系：

（1）物质是第一性的，意识是第二性的。

（2）物质是第一性的，信息是第二性的。

（3）意识是第一性的，信息是第二性的。

第一点是说，物质在历史上先于意识，产生了意识，所以物质第一性，意识第二性^③。

第二点则说，物质还产生了信息的物质载体，有了信息的物质载体，才有信息，所以，物质是第一性的，信息是第二性的。

第三点又进一步说明，由物质产生的意识创造了信息的话语

① 参看B.Ⅱ.别克利斯：《人、控制论和上帝》，载苏联《科学与宗教》杂志1960年第2期。

② 转引自克劳斯：《从哲学看控制论》，中国社会科学出版社1981年版，第63—64页。

③ 参看克劳斯：《从哲学看控制论》，中国社会科学出版社1981年版，第73页。

义,信息的语义是在有了意识以后才产生的,所以它依赖于意识,克劳斯把信息的语义称之为“二级派生的东西”。

根据信息与物质、意识之间的依存关系,克劳斯认为信息决不是物质与意识之外的第三种独立不依的存在成分,信息与物质、意识有依存关系,信息是由物质产生的载体和由依赖于意识的语义构成的统一体,从而克劳斯对信息的实质提出自己的看法,认为信息是由物质成分与意识成分完全按照特殊方式融合起来的特殊的新质^①。

克劳斯一方面批判了那种认为信息是与物质和意识并列的第三种本原的观点,另一方面自己又提出了信息是由物质成分与意识成分融合起来的特殊的新质,它既是客观的,又是不实在的,是一种介于物质和意识之间的第三种东西。当然,克劳斯的观点与贡泰尔还是有些区别的,贡泰尔认为信息是超越于物质和意识之外的独立的第三种本原,克劳斯则是在承认物质第一性、意识第二性哲学基本问题的前提下,认为信息是依赖于物质和意识,并由二者融合起来的第三种东西。

克劳斯的观点有一定的代表性和典型性,他在后期的著作《控制论和认识论》(1972年)以及《控制论——社会通用新哲学》(1973年)中仍然认为,信息虽然依赖于物质,但不能完全归结于物质,也不能完全归结于意识(因为信息是信号和语义的统一),信息是物质的第三方面(与实物方面和能量方面相并列)^②。

从以上所列举的关于信息实质的各种看法,对目前哲学界在这个问题上的争论情况,可见一斑。

① 参看克劳斯:《从哲学看控制论》,中国社会科学出版社1981年版,第82页。

② 转引自杨科夫:《物质信息与观念信息》,载《自然科学哲学问题》丛刊,1980年第3期,第69页。

我们认为，对于这一问题，不可简单地信息就是物质的或者就是精神的，但可以把信息看作是一切物质的普遍属性。

首先，任何物质都可以成为信源。无论是无机界或是有机界，大至宏观的宇宙天体，小至微观的基本粒子，从单细胞的生物到结构复杂的人体，从自然界到人类社会都可以成为信源，都可以发出信息。其次，任何物质都可以产生信息。信息的产生要以物质系统的运动，物质系统的相互作用为前提，物体之间、物体与其环境之间相互联系、相互作用的内容与结果，除了物质、能量外，其中还包含了信息，如无机界中铁与氧的相互作用所产生的化学反应，可以看作是信息的表现；在有机界中，树墩上的年轮表现了树木的生长年龄及其发展特征的信息；蜜蜂以舞蹈动作表示的某种信号，这些也都是信息的表现。第三，任何物质运动过程都离不开信息的运动过程。运动是一切物质的根本属性，物体在运动过程中，必须伴随着信息的获取、传递、变换与存贮等过程。而伴随着电磁波、声波的运动变化过程给人们带来的，乃是各种各样的信息获取、传递、加工与存贮等过程；在无机界中，海潮的涨落既表现了月球绕地球运行的运动规律和运动过程，同时也告诉了我们月球绕地球运行的信息；而人的认识，既是人脑这一高度组织起来的物质器官的运动过程，同时也是人们从外界获取、传递、加工、存贮、使用信息的复杂运动过程。从上可以看出，信息不只是生物界、社会、机器所特有的功能现象，早在生命现象出现以前，自然界中的无机物之间、无机物和其周围环境之间无疑存在着相互作用，存在着运动、变化过程，而伴随物质运动变化过程所留下的痕迹和印记都是信息运动过程的表现，不过无机界的信息传递、交换、存贮过程采取简单的形态，是没有人参与的客观自然过程。信息作为一切物质的普遍属性是与物质不可分的，哪里有物质存在，哪里就有信息。信息不只是在生物系统和社会系统中才存在。如果把信息只看作为生

物、社会、机器等控制系统的一种功能，那末，在生命、人类社会出现以前，无机界在其长期发展过程中所留下的痕迹和印记，是否就不包含着自身的信息？当人类社会产生以后，人们限于科技发展水平，对自然界的某些物质系统的运动变化状态未能认识，那末，其中是否就不包含信息？如果不包含，那末人类又怎样认识物质世界的过去、现在和未来？怎样去探索世界的奥秘？又怎样能动地去改造物质世界？事实上，随着信息概念以及信息基本理论在各个领域的推广，人们已把若干万年前，无机界运动变化过程，在大自然中所留下的痕迹和印记，看作是信息。至于那些尚未被人们认识的物质运动过程，也不能认为其中不包含信息，不过可以把它们看作是自在的，还未被人们取得、传递、加工和使用的。当然，这也表明，在没有人参与的物质系统的信息运动过程，是一个客观的自然过程。当生命出现，特别是人类产生以后，信息作为控制系统的一种功能现象，表明了信息的运动过程在控制系统中得到了进一步的完善和发展，它不仅是简单的信息传递、变换、存贮过程，还有加工、使用、反馈等等，以便控制系统进行自我调节，实现最佳控制的目的。高级的信息运动形态表明了信息作为物质的普遍属性在新的条件下得到了进一步的发展和完善，有了新的特性和表现，因此不能用高级发展了的信息运动形态去否定低级的信息运动形态，从而认为信息只是控制系统的功能现象，否认信息是物质的普遍属性。

信息是一切物质的普遍属性，但是信息不等于物质，也不可笼统说它是物质的，信息是与物质既有联系又有区别的不同范畴。正如运动、时间、空间是物质的属性，与物质不可分，但运动、时间、空间等范畴不等于物质范畴；意识是大脑这种高度完善的物质的属性，但意识不是物质；同样，信息作为物质的属性离不开物质，但信息不等于物质。

信息作为一切物质的普遍属性有它自己的特点：第一，信息

表现物质系统的运动状态、物质系统运动变化的方向性。表明了系统的组织程度、有序化程度以及系统朝着有序或无序的方向发展。系统的变化发展方向是与信息有关的。第二，信息以表现物质系统的差异性为其特征。没有差异就没有信息，它必须表现出事物的差异，能够提供物质系统在运动变化过程中新出现的特征。例如报纸、电台报导的新闻消息，反映了国内外大事的各种动态，每天都有变化和差异，都有新的内容，为人们提供信息，如果天天、月月、年年如此，没有任何差异，那就不是什么信息。第三，在人类社会中的信息和信息运动过程又有其自身特点：（1）人类社会的信息，究其信源来看，有一部分来自人类社会赖以存在的自然环境。这一部分信息无疑是客观外界物质系统运动的表现，是物质的属性。还有一部分来自人类社会本身，其中有些直接来自社会物质生产过程，来自一定的生产方式，而有些则来自社会的精神生活，如政治、法律、伦理、美学、宗教等方面，但归根到底它们都来自一定社会的生产方式，都反映了一定生产方式的特征，因此，从人类社会的信息来源看，都是物质系统（自然、社会）运动过程的表现，从这一意义上讲，社会信息也是物质的属性。（2）在人类社会中，无论来自自然界或人类社会本身的信息，只要它为人们所获取、利用，就必需为人脑所加工。客观外界的信息由于经过大脑的选择抽取、逻辑加工，它已不是客观物质世界信息过程的原型，而是在人脑中所形成的、对客观现实信息反映过程的思维信息，因此，它是第二性的、观念的，属于意识范畴。（3）人类社会的信息，一般来讲，都是用语言来表达的，而语言除了它的思想内容外，还要有物质材料——声音、词、词汇作为表现形式，所以，语言、文字等是一种以思想为其内容，声音、词、词汇等为其物质外壳的新的信息形态。（4）人是社会的人，不同的时代、不同的人，由于生产与科学技术发展的水平，人们的社会地位、文化程度、接触范

围以及需求等等的不同，对外界提供的信息能否接受以及理解程度、使用程度均有所不同，从而涉及信息的意义和价值等问题，涉及人这一主观因素，涉及人类社会的信息是否就是主观的？这一问题如同真理问题一样，真理是人们认识中对客观事物及其规律的正确反映，真理所包含的认识的内容是客观的，而人们能否掌握真理、使用真理则不仅受客观历史条件也受人们的主观条件的限制，但这不等于真理是主观的，只有客观真理，没有主观真理。同样无论是自然界或人类社会的信息，都是物质系统本身具有的普遍属性，人们虽然在接受、理解与使用等方面有所不同，但不能因此改变人类社会信息的来源和内容的客观性。

总之，信息是一切物质的普遍属性，人类社会中经过人脑加工处理的信息，属于意识范畴，但其内容来自客观世界，表达形式则以声音、文字等为其物质外壳，不同的人在接受、理解、使用情况方面虽然有所不同，但不能因此改变人类社会信息来源及其内容的客观性。

此外，关于信息的实质，有的人还认为，信息究竟是属于物质还是属于意识这种提法本身就是不科学的，因为“信息是一切物质的一种属性，是物质之间联系的一种形式；意识是信息运动的过程；意识对物质的反映过程是信息过程，意识和物质的相互作用也是信息过程”^①。这种观点也是应该认真加以研究的。

第三节 信息与能量、物质的关系

维纳在《控制论》一书中曾明确指出，信息不是物质也不是能量，信息就是信息。此后不少人对它们的区别加以研究，进行比

① 查汝强：《20世纪自然科学四大成就丰富了辩证自然观》，载《中国社会科学》1982年第4期，第27页。

较,如前所述苏联的罗维斯基,民主德国的克劳斯等。那末,信息与能量、信息与物质,除了相互区别外,还有没有其他的联系呢?

信息与能量的联系

关于信息与能量的内在联系,西方讨论得很热烈。对于这一问题的提出与研究,可以追溯到很多年以前。如前所述,早在1864年鲁道夫·克劳修斯引进了熵这个概念,后来波尔兹曼还把熵与信息联系起来,认为熵是一个系统失去了“信息”的量度。

那末,熵、信息和能量之间的关系是怎样提出的呢?热力学第二定律一提出,科学上就出现了争论,其中涉及“麦克斯韦妖”的争论。1871年麦克斯威尔在《热的理论》一书中提出著名的“麦克斯韦妖”问题。“麦克斯韦妖”是一个假想物,是作为热力学第二定律的一个可能的反例而提出的。他假设,有一个充满空气并且温度均匀的容器,中间装有一扇活门,把容器分为A、B两室,开始这两个室的温度一样,后来,“麦克斯韦妖”就打开活门,活门的开关只允许运动较快的分子从A室进入B室,而较慢的分子只能从B室进入A室。这

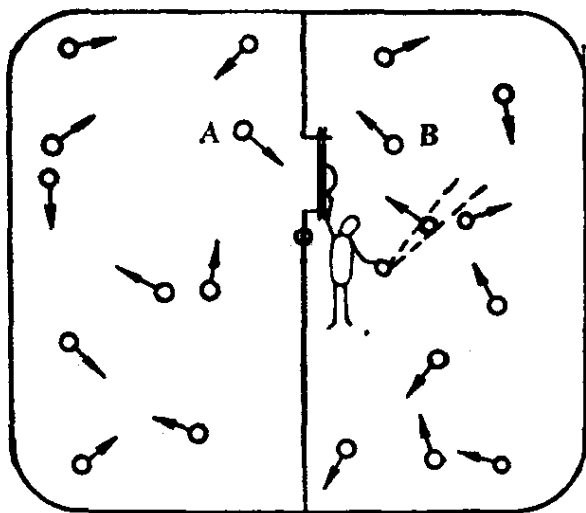


图 10·1 麦克斯韦妖

样,“妖精”就能在不消耗能的条件下提高B室的温度,这表示热量可以自发地由低温物体流向高温物体,从而向热力学第二定律提出了挑战,到底热力学第二定律还能不能成立,熵增加原理还对不对?这个“妖精”能不能存在?这一问题提出后,长期以来一直争论不休。在争论过程中涉及到信息的作用以及信息和能量的关系问题。如果这个“妖精”存在,这末“妖精”为了控制活

门，就必须掌握有关分子运动快慢的信息，从而有选择地打开活门，让快分子进入A室，慢分子进入B室。而“妖精”要获得信息，就需要消耗一定的能量，从而涉及信息与能量的关系问题。可见，熵、信息和能量之间存在着内在的联系问题比申农研究信息论早了好多年。

1948年申农创立了信息论，提出了信息的度量问题，采用了“熵”这一术语，虽然，申农的信息度量和统计热力学中所采用的度量是同一名称、同一函数，都叫熵（H）。但是，申农在当时对它们之间的内在联系并未解决，因为申农对热力学没有直接的兴趣，而是独立地提出信息的度量，并且和冯·诺意曼商量后才采用这一名称的。但是，这种同一函数、同一名称的出现，在物理学家中却引起了极大的兴趣。在以后的工作中，作出贡献的就是法国物理学家L·布里渊，他在一系列论文和1956年出版的《科学和信息论》的专著中，把两个熵作为同一东西看待，从而驱逐了“麦克斯韦妖”，并且解决了信息与能量之间的关系问题。他指出，如果“妖精”要打开活门，就必须分辨分子运动快慢的速度，因此就要设法照亮分子，这就必须提供亮光，就要消耗能量，这样，才能获得分子运动快慢的信息。换言之，如果没有照亮分辨分子运动所需要的能量的输入，“妖精”就缺少足够的信息来控制分子的运动方向，因此“妖精”的活动就不可能。如果把容器、气体、活门和“妖精”组成的系统看作是处在热动力平衡状态中，即这一系统不存在能量转换或能量传递过程，那末，原则上“妖精”控制分子运动的方向是不可能的，因为这种系统不可能提供对分子运动进行辨别的信息。因此，这种不消耗功的“妖精”是不存在的。

布里渊在反驳“妖精”存在的可能性中，建立了信息和能量之间的内在联系，这种内在联系可以定量的计算出来。

在有 N 个等概状态的物理系统中，输入能量 Q ，对应熵变化为

$$\Delta S = \frac{Q}{T} = k \log N$$

k 为波尔兹曼常数， T 为绝对温度。假定该系统仅有两种等概率状态， $N=2$ ，其平均信息量为 $I = \log_2 2 = 1$ 比特，该系统相应熵变化为 $\Delta S = k \ln 2 = 10^{-16}$ 尔格/ $^{\circ}\text{K}$ ，增加1比特信息相当于使系统的熵减少数量级为

$$1 \text{ 比特} = k \ln 2 = 10^{-16} \text{ 尔格}/^{\circ}\text{K}$$

这就是本书在第七章第二节中提到的信息与熵二者之间的关系。

其中 k 为波尔兹曼常数。这一公式说明，获得一比特信息相应耗能为 10^{-16} 尔格/ $^{\circ}\text{K}$ 。可见，信息的获取必须借助于一定的物质过程，并伴随着消耗一定的能量。

信息和能量的这种内在联系，有些哲学家从哲学的角度，用物质世界的统一性观点加以说明。1962年，苏联的A.И.别尔格在《哲学百科全书》第2卷“控制论”条目中指出，信息和物质的不可分割的联系特别表现在一些能量定律和信息定律在结构上相似。概率论中的熵这一概念既应用于通信的领域里（作为关于客体的消息中信息不足的度量），也应用在统计热力学的领域里（作为能量耗散的度量）。这些概念的深刻共性可以从下面看出：负熵乃是运动物质的组织程度之定量度量，另一方面又是它的属性、反映属性的定量度量。世界的物质统一性也表现在物质的能量属性和信息属性的这种结构上的共性中^①。

现代科学技术发展提供了大量材料，进一步证明信息与能量是密不可分的，信息的获取与传递离不开能量，而能量的转换与驾驭又离不开信息。一个现代化的防空系统，需要有强大的能源

① 参看别尔格：《控制论的哲学问题》，载《外国自然科学哲学资料选辑》第四辑，第119—120页。

来维持系统的运转，才能获得防空信息，如雷达装置的运转，要有电能发射无线电波，才能获得有关目标物如飞机、导弹、运载火箭之类的坐标、速度、航向等方面的信息。同时，如要摧毁敌方的目标，则需要有强大能量的打击武器，如核弹头、导弹等等，但是，要驾驭这些具有巨大能量的打击力量，则又需要准确的信息。如当雷达搜索得到有关目标物的信息后，要通过信息传输系统送到指挥控制中心，并且利用电子计算机从中算出导弹发射的信息：发射的时刻、发射的轨迹等等，有了这些信息，控制中心才能下达指令（信息），发射出导弹，从而驾驭巨大能量，去击中敌方目标，否则，如果没有准确的信息去控制核弹头、导弹，则这些有巨大能量的打击武器，只不过是一个盲目的破坏者。可见，获得信息、传递信息以及信息的转换等等需要能量，而能量的驾驭又离不开信息。1971年美国的迈伦·特赖布斯，爱德华·麦欧文发表了《能量和信息》一文，文章认为信息的获取离不开能量，而能量的转换与驾驭则又需要信息，文章最后提出：“信息和能量是难分难解地交织在一起的。‘知识就是力量’这句话所表现的智慧是值得我们深思的”。①

信息与物质的联系

信息与物质的联系是毋庸置疑的，现代科学表明，信息的产生、表达、传递、存贮等等离不开物质，要以物质作为基础，作为载体。信号、符号、声波、电磁波是表达信息、传递信息的物质载体。没有电磁波，广播电台就不能传送信息，没有声波、没有语言文字，人们就无法交流思想。而磁带、磁盘、书籍、杂志等等，则又是存贮信息的物质材料；DNA是生物存贮遗传信息的物质载体；人脑是加工与存贮思维信息的高度组织起来的物质器

① 迈伦·特赖布斯，爱德华·麦欧文：《能量和信息》，载《摘译——外国自然科学哲学》1974年第2期，第7—11页。

官。可见信息的存贮也离不开物质，没有物质材料作为载体，信息就无处存身。因此，决不可能有不依赖于物质而存在的信息。1963年罗维斯基指出，声波具有一定的能量，但它不是信息，而只是信息的媒介。声波和其他传递信号的物质手段本身不是信息，但是没有它们就不可能有信息。物质信号的存在是获得信息的必要条件^①。

材料（物质）、能量、信息三者的地位

由于信息概念已经渗入人类社会生活的各个领域，信息的重要性越来越为人们所认识，而且在现代科技发展中起着越来越大的作用，所以把材料、能量和信息看作是现代科技发展的三大支柱，三者并驾齐驱，鼎足而立。有人还把三者的关系形象化为巧妇与柴米之间的关系。中国有句成语：“巧妇难做无米之炊”。柴和米指的是能源和材料，而巧妇之巧在于善于利用信息，如火候、色、香、味等等。这就是说，巧妇再巧，没有米和柴也做不好饭，同样，如果只有米和柴，而不能掌握做饭的信息，当然也做不好美味可口的饭菜。

当前在新的技术革命中，信息的地位与作用尤为突出，西方国家有些人认为，知识已经成为最主要的工业，它提供经济社会生产所需的重要资源，因此，他们认为“信息成为比物资或能源更为重要的资源。”^②随着信息在社会生活中地位的日益提高，自然科学界和哲学界目前正在提出一个问题，即材料（物质）、能量、信息三者当中，何者更基本一些，重要一些。1979年在我国信息论专业学会第三届年会上有人指出：“在自然科学和哲学界正在发展着一种思想，认为形式、结构、关系（包括差异）以

① 罗维斯基等：《机器与思维》，三联书店1963年版，第116—117页。

② 转引自1982年日本《现代用语基础知识》。

及类似的东西比物质和能量更基本些。我们知道正是差异、变化（形式的，结构的……）和关系等是由信息来表征的，或者说，他们内含着信息。”他还引用了意大利学者朗高（Longo）的看法，朗高认为这种思想可以追溯到2000多年前的毕达哥拉斯时代。只是因为物质和能量在改进人类生活方面所起的作用更容易被人认识，信息才长期未受到注意^①。这一问题的提出，很值得进一步探索。既然世界是物质的，而物质内部又有自己的结构，结构又表征着或包含着信息，那末，是否信息比物质更为基本，更为重要？材料（物质）、能量、信息三者中，何者更为基本这一问题的提出，从哲学角度看，涉及哲学中本体论方面的问题，这是需要认真研究、深入探讨的。

第四节 信息与反映、意识、认识论

关于信息与反映、信息与意识、信息与认识论方面的问题，一般来讲，在苏联及东欧的文献中论述的较多，近年来，我国的杂志上也有一些关于这方面的文章。

信息与反映

信息与反映的关系问题，涉及对信息概念的理解以及对信息实质的看法，如前所述，在信息实质问题中，苏联哲学界存在着两种不同的观点：功能论与属性论。他们在信息与反映关系问题上亦有各自的看法，有共同的出发点，亦有其分歧之处。其共同的出发点的根据乃是列宁的一段论述：“假定一切物质都具有在本质上跟感觉相近的特性、反映的特性，这是合乎逻辑的。”^②

① 参看蔡长年：《信息论专业学会第三届年会开幕讲话》，载《信息论与沃尔什函数》，中国电子学会信息论专业学会编，1980年，第9页。

② 列宁：《唯物主义和经验批判主义》，人民出版社版，第86页。

他们认为既然列宁的反映论把反映看成是一切物质的共同属性，根据这一理论，信息与反映是相互联系的。这是他们的共同出发点，但他们又有分歧^①。正如乌克兰因采夫1963年在《信息与反映》一文中所概括的那样，在苏联哲学文献中，对信息与反映的关系存在两种意见，一种认为信息与反映基本上是同一概念；另一种则认为，它们是很接近的，但不总是相吻合的。

首先介绍功能论的观点，其代表人物是乌克兰因采夫、茹科夫等。1963年乌克兰因采夫在《信息与反映》一文中论述了信息与反映的关系，认为虽然反映与信息是标示不同现象的不同概念，但它们之间是相互联系的，它们之间有若干的共同特征，有其统一性：

1.反映和信息具有重要的一般特征：它们不存于物质过程之外，它们本身是物质系统相互作用而发生的变化形式。同时，它们也不能与任何一种物质或运动形态等同。

2.信息以反映为基础，没有反映就没有信息，而且信息和反映有相同的内容：被反映对象的特性。信息以反映为基础，依赖于反映，没有反映，信息就不能存在，具体讲，首先是外界环境作用于控制系统而引起反映，这种反映必须经过控制系统（或通信系统）的调制，才能变为信息过程。通信系统的通信内容依赖于反映，没有反映活动就不可能有信息。

3.信息与反映都具有同构性。所谓同构即指格局相同（或布局相同）。例如照相，底片和洗印出来的相片是同构的，底片上是方格，相片上也是方格，底片上是圆，相片上仍然也是圆，底片上各部分之间的某些关系在相片上还是那些关系。又如地图，它和它所表现的地面是同构的。所以，同构性即指两个系统在格

^① 参看刘仲：《苏联哲学界关于信息概念的争论》，载《国外社会科学》，1980年第7期，第73—74页。

局上（组织结构上）有一一对应关系。

反映的同构性在于，被反映的系统和反映系统之间引入某些中间系统，归根结蒂只改变反映的形式而不改变它的内容（如果不考虑可能的干扰）。反映的内容（被反映对象的特性）不依赖于反映的表现形式，如对物体温度的反映可以有各种不同的形式：水银柱高度的不同，手的热感的差异，联接热电偶的电流计的指针的偏转角度的改变，等等，反映的形式是多样的，但反映的内容却不变：一定的温度。

信息的同构性在于，信息内容与信息载体——信号、符号等等之间有一一对应关系，一定的信息内容对应一定的符号、信号；或者，在保持信息内容不变的条件下，一种信号可以转换为另一种信号，一种字母表可以转换成另一种字母表，即信息内容，一种符号（或信号）与另一种符号（或信号）有着有一一对应关系。

虽然信息与反映有其同一性，是接近的范畴，但乌克兰因采夫认为，它们之间还是有区别的两个不同概念，其区别有以下几点：

- 1.反映是一切物质具有的属性，是一个物质系统作用于另一个物质系统的特殊产物，它是第一个系统的特性以另一种形式在第二个系统的特性中的再现。信息则与反映不同，信息是在控制系统或控制系统的联合的特殊条件下的普遍联系的特殊形式。信息是在物质的一定的组织程度上产生的，信息和控制是一对对偶范畴，缺少其中一个都不能揭示出另一个。

- 2.信息和反映的内容（被反映对象的特性）虽然相同，但是，信息是反映的内容，加上这个内容经过信道的传递以及在控制过程中加以比较、概括等办法，对反映内容所进行的加工。

- 3.信息的内容可以是现在没有发生而将来要发生的事件。如控制系统所发出的指令，这一指令的内容可以是当时还没有发

生，但将来要发生的事件的信息，而在无机物中的初级反映不可能以物体未来的现象的特性作为自己的反映内容。它只能对现时的周围外界环境的刺激作出反映。

4.信息的量度和对反映作量的估计也有差别。对信息可以作定量的计算。信息量的概念与系统的组织程度相联系，和熵的概念相联系，在控制论中，信息量是控制系统的本身组织程度的度量，信息量不是物质反映能力的度量。而在反映论中，找不到类似于信息量的反映量的概念，反映量则是指反映的符合程度，是物质反映能力的度量，是表明反映以什么样的完善程度再现被反映者的特性。这种程度是可以用量来表示的。例如，在用仪器测量时，有一种计算仪器读数误差的方法，可以根据不完全符合的反映，以求出那些参数完全符合的反映，从而计算出反映的符合程度。

5.一个有组织的系统，随着熵的增加，组织的破坏，就意味着信息的丢失，如果一个控制系统，它的组织濒临瓦解，就意味着信息的完全丢失。但是反映能力是不可能消失的，因为无组织的系统中，也存在着对外部世界的初级反映形式^①。

另一种观点为属性论，其代表人物是塔拉先柯，乌尔苏尔等。1963年塔拉先柯在《关于控制论中“信息”概念的定义》一文中指出，“控制论中的信息概念类似于由辩证唯物主义所研究的反映概念。控制论中的信息概念与哲学中的反映概念是物质的同一属性的不同抽象。”其理由如下：

1.信息与反映都是物质的普遍属性。根据列宁的看法，可以认为反映是物质的普遍属性。至于信息，塔拉先柯认为，它不仅是人脑的属性，而且是一般有机物的属性，在动物之间可以发生信息交换，如野兽与鸟类所发出的危险警告的声音信号。植物也具

^① B.C.乌克兰因采夫：《信息与反映》，载《外国自然科学哲学资料选辑》第四辑，第232—249页。

有获得周围环境变化的信息的能力,从而使自身适应外界环境。塔拉先柯还认为,产生信息关系的能力不只限于生物界。所以,他认为信息的概念要推广,是物质的普遍属性,并且在这篇文章中,把信息与反映作为同义语——信息(反映)或反映(信息)来使用。

2.信息概念或反映概念之间存在着一定的联系,反映关系包含着信息关系。塔拉先柯认为,反映的属性就是在相互作用着的对象状态之间存在着一定的联系、对应关系、同构关系或同态关系。反映的属性不仅为对象所具有,而且也为过程(即对象的变化)所具有,并且在互相反映过程之间的对应关系中表现出来。反映概念和信息概念之间存在一定的联系关系。反映关系包含着信息关系。当对象(或过程)A和B之间存在着对应关系时,我们就说对象(或过程)A中包含着关于对象(或过程)B的信息。如感觉与现实之间的对应关系,电压表指针与电压之间的对应关系,等等。当某一对象反映另一对象,这个对象就包含着关于另一个对象的信息。电压表指针的摆动反映了电压的变化,就包含了电压变化的信息。信息与反映是从不同的角度表现了同一些现象的共同的東西——物质对象状态之间、过程之间的对应关系。

因此,基于上述理由,塔拉先柯认为控制论中的信息概念与哲学中的反映概念是物质的同一种属性的不同抽象。但是,他又认为反映概念与信息不能等同,两者是从不同的方面来研究的。反映是从哲学方面(从认识论、反映论方面),而信息则从自然科学方面(信息论、控制论方面)进行研究的,哲学所感兴趣的是对反映(信息)类型之间质的差别(信息的质的区别是指信息的价值、信息的意义)。而控制论的信息概念则可以说是对某几种类型的信息(反映)作量的描述^①。在40年代,申农、维纳等当时确实是从量的角度对信息概念进行了描述,没有考虑信息的

^① T.П.塔拉先柯:《关于控制论中“信息”概念的定义》,载《外国自然科学哲学资料选辑》第四辑,第253—255页。

质，但经过30年来科学技术的发展，信息概念以及信息理论在各个领域的推广与运用，这种描述已显出严重的不足，需进一步克服，给出一个更为科学的概念，这正是目前信息科学所需解决的问题。

属性论的另一代表人物苏联的乌尔苏尔认为：“信息不仅是反映的内容和形式，也是反映过程的内容和形式。”^①

1980年 A.П.苏哈诺夫在《信息与人》一书中也谈到：“信息与反映的一个不可分割的方面，即反映的内容、反映过程的内容和结果。”^②

我国也有人认为，“一切物质都有反映的属性。一切物质都既是反映者又是被反映者，反映过程必然同时就是信息运动过程，至少是信息的传递、变换、编码过程。”^③同时，他还认为反映和信息的两个概念所反映的事物关系的角度不同，但二者的外延是相同的，信息是从一个事物的某种属性经过变换向另一个事物转移的角度，反映是从两个事物之间的相似关系的角度。但是二者都是揭示事物之间的普遍联系和相互作用的^④。

总之，关于信息与反映的问题，功能论与属性论有共同的出发点，亦有分歧之处。其共同出发点：都认为信息与反映是有联系的。而他们的分歧在于：功能论认为信息与反映的联系不具有普遍性，信息只为生物界、社会、机器所特有，信息是控制论的概念，信息所指的反映，不是所有的反映，而是指有目的性的、

① A.Д.乌尔苏尔：《认识论和逻辑学中的信息方法》，见《摘译——外国自然科学哲学》1974年第2期，第17页。

② A.П.Суханов, 《Информация и человек》, Москва, 《Советская Россия》, 1980, стр36.

③ 查汝强：《20世纪自然科学四大成就丰富了辩证自然观》，载《中国社会科学》1982年第4期，第26—27页。

④ 参看同上书。

有序性的反映，只有生物、社会、机器的反映过程才属于信息过程。而无机界的反映不是信息，无机界只存在信息的前提，信息的可能性，所以信息与反映不具有普遍的联系。而属性论则认为，信息不只是为生物、社会、机器控制系统所具有，无机界也存在着信息，信息与反映有普遍联系关系，所有的反映过程都是信息过程。

信息与意识

信息与意识的关系问题，它不仅是两者的关系，同时也与反映有关，因为意识与反映是相互联系着的哲学范畴，所以在探讨信息与意识的关系时，必须要把信息、反映、意识三者的关系联系起来加以考虑。

关于反映、信息、意识三个概念之间的关系，1976年茹科夫在《控制论的哲学原理》一书中作了简略概括。他从功能论的观点出发，认为三个概念的关系是种属关系，可以定义为：现实信息是有目的地调整了的反映，即功能反映；而意识是一种最高的信息过程，反映的最高形式。而且他还画出了三个概念外延相互关系的示意图，用三个同心圆来表示^①：

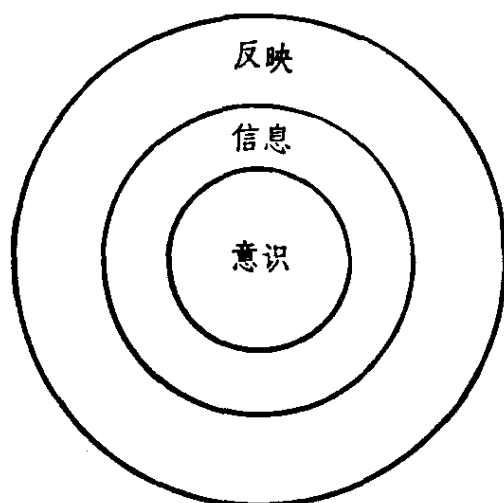


图 10·2 反映、信息和意识三个概念外延的相互关系示意图

图中最大的圆表示反映，中等的圆表示信息，小的圆则表示意识。按照概念的外延和内涵的反比法则，外延最窄的意识概念具有最大的内涵。从概念的外延来看，信息概念小于反映概念，

① 参看茹科夫：《控制论的哲学原理》，上海译文出版社1981年版，第140页。

是反映的一个方面，意识概念又小于信息概念，它是最高的信息过程，是反映的最高形式。反映、信息和意识三个概念之间的这种关系，茹科夫认为是与三者在地球上产生的历史顺序有关，他认为反映是一切物质具有的，信息过程则和地球上生命的产生一起出现的，而意识则是社会关系的产物，社会关系的形成又几乎与人脱离动物界同时发生的。所以按其出现的先后顺序看，先有反映，再有信息，最后才有意识。

从茹科夫的观点中，可以看出，他把反映、信息、意识看作是既相联系，又有区别的不同概念，信息和意识依赖于反映，是反映的一种，但它们之间不能完全等同，因为反映不一定是信息和意识，如无机界的反映；意识是最高形式的信息过程，但是信息过程和认识过程也不能划等号，如生物界的信息过程和人的认识过程是不能等同的。

当然从属性论的观点看来，既然信息是一切物质的属性，反映也是一切物质的属性，所有的反映过程都是信息过程，反映过程有高低级之分，信息过程也有高低级之分，而意识则是高级的反映形式，意识通过感觉、思维反映现实，则是极为复杂的信息运动过程，所以意识对物质的反映过程是一种高级的信息运动过程。

至于信息和意识的关系问题，克劳斯则持另一种观点，他认为信息的产生与意识有关，如前所述，1961年，他在《从哲学看控制论》一书中说过，物质产生的意识，终归创造了信息的语义。而信息的语义是由意识产生的“二级派生”的东西（即由意识派生的东西）。并且他还举例加以说明，他说，留声片转动起来后，它所发出的声波自动地传送给广播站，转变为电波，又在收听的地点收到它，再通过技术装置转交给打字机键盘，最后将全部讲话内容用书面文字表达出来。而这些传递、加工、存贮信息的仪器、装置，以及这篇讲话的内容，是由“能思考”有意识

的人创造出来的，所以意识显然参与创造信息的工作^①。总之，克劳斯认为信息既依赖于物质，又依赖于意识（即指人的思维的创造），是由意识派生出来的东西。

信息与认识论

人的认识过程是否是一个信息过程，申农的信息论能否用于认识论，在这一问题上也存在着几种不同的看法。

一种意见认为，可以用信息论的观点分析人的认识过程，信息论可以用于认识论；另一种观点则相反，认为在认识论中应用信息论是没有根据的，人的反映过程不是信息过程；第三种观点则认为可以把信息论用于人的反映过程，但不可简单搬用。

维纳的观点属第一种，他在论述人的认识过程时，用信息的观点加以分析。1950年他在《人有人的用处》一书中谈到人的信息传递过程时说，“人通过感觉器官感知周围世界。在脑和神经系统中调整获得的信息，经过适当的储存，校正和选择等过程后进入效应器官，一般来说，也就是进入人的肌肉。这些效应器官反作用外部世界，再作用于中枢神经系统。运动感觉器官所收到的信息又同已经储存的信息结合在一起影响将来的动作。”^②这就是说，人类的各种感觉器官是信息的接收装置，人们通过自己的感觉器官接收周围世界的信息，而人的神经系统则是信息的传输系统，信息通过神经系统传入大脑，大脑又是人对信息进行加工处理的器官，信息经过加工处理后，大脑对人体的各部发出信息，指挥人的行动，以适应外部世界，并能能动地改造客观世界。从上述可以看出，维纳把人认识世界、改造世界的过程，看作是人们对信息的获取、传递、存贮、加工和使用的过程。

第二种观点对能否把信息论应用于认识过程持反对态度，认

① 参看G.克劳斯：《从哲学看控制论》，中国社会科学出版社1981年版，第73、65页。

② 维纳：《人有人的用处》，商务印书馆1978年版，第20页。

为人的反映过程不是信息过程，其理由概括如下：

1. 电子计算机接受外界的信息，只是由 0 和 1 组成的一些抽象的符号，是外界事物的一种抽象的表现形式，是脱离了具体内容的纯粹形式上的关系。人的反映则是通过眼、耳、鼻、舌、身这五个官能，把客观外界的现象反映到头脑中来，这些感觉印象是活生生的，有具体内容的，人的感觉不是抽象的符号。人脑反映外界事物绝不是一个简单的信息传输过程。

2. 人的感官是在大脑支配下反映外界事物的，是积极的、能动的过程，而不是消极的、被动的反映，不是简单的、抽象的信息输入。人反映世界的目的是为了改造世界。

3. 人是社会的人，在阶级社会中，人们的“各种思想无不打上阶级的烙印”。同一条消息对不同的人有不同的反映。输入的信息的社会内容可以是一样的，但对不同的阶级、不同的人，其作用则大不一样，这用生物学无法说明，用申农的信息论也无法说明，只能用人的社会性、阶级性才能说明。人的社会性才是反映内容中最本质的东西。用信息论取代反映论，实质上是否认人的社会性，抹杀人的阶级性^①。

第三种观点则认为，把信息论的理论简单搬用于人的认识过程是不对的，因为申农的信息论有其局限性，要把信息论用于认识论，必须克服其不足之处。

例如，苏联的乌尔苏尔不同意在认识论中简单搬用信息论。1968年他在《认识论和逻辑学中的信息论方法》一文中，介绍了苏联哲学界关于信息论可否用于认识论有两种看法：一种认为在认识论中应用信息论方法是没有根据的，另一种观点则把反映论归结为信息论。乌尔苏尔认为两者都犯了绝对化的错误，前者把反映论和信息论的对象和方法的不同之处绝对化，后者则把它

^① 参看凌弓志：《信息论研究中的两种态度》，载《摘译——外国自然科学哲学》，1974年第2期，第1—2页。

们的相同之处绝对化。

乌尔苏尔认为，现有的认识的信息模型是建立在几率、统计信息论基础上的。但是，反映过程不应仅仅归结为统计过程，把统计信息论应用于认识过程，也就是暗中假设了认识就是统计过程，这种观点是错误的。他认为，反映过程即认识过程，不仅包括统计过程，而且也包括动力学过程，认识过程既不能归结为提出假设和假说，也不能归结为其他的几率规律性和可能形式。同时，他还认为，从信息论的观点分析认识过程，通常不研究反映的实效方面，即信息的价值问题，这是没有根据的，因为认识是和估价有联系的，形成概念时，经常要应用信息的有效性质。乌尔苏尔指出，任何认识过程都是有目的的，首先，主体在获得信息时，就是挑选知识中对复制客体有价值、有实效的那一部分；其次，人们在利用信息过程中，在生产中起着最重要作用的，正是信息的价值，即信息的有效性。所以他认为在认识论中，简单粗糙的搬用信息模型是不行的。

乌尔苏尔认为要在认识论中应用信息论，必须要作到以下几个方面：

1. 克服信息论统计模型的局限，建立认识过程的更为一般的信息模型。

2. 在应用信息论方法之前，必须把认识论的著名原理翻译成控制论和信息论的语言，而且把认识论的语言翻译成信息论语言，不应把这看成是最后目的，这只是最初的必要的阶段，接着就应该对科学认识进行信息论的研究。

3. 人的认识是有目的的，人们在获取信息、利用信息时，常常要考虑信息的有效性，即信息价值，因此在建立认识的信息模型时，要考虑信息的有效性^①。

^① A.П. 乌尔苏尔：《认识论和逻辑中的信息论方法》，载《摘译——外国自然科学哲学》1974年第2期，第12—18页。

人的认识过程可以说是一个信息运动过程，但却是一个极为复杂的信息获取、传递、加工、存贮、使用的运动过程。对于这个复杂生动的过程，目前认识的还很少。要建立适用于自然、社会以及人的思维的更为一般化的信息模型，不仅涉及有效信息、语义信息、模糊信息等问题，而且这些问题的解决与对人脑机制的研究，人的社会性的研究都有关系。所以在认识过程中一般地简单搬用申农的信息论是远远不够的，当然，在这里我们并不否认信息论的产生对于马克思主义认识论的意义。第一，由于信息论的产生，使人们发现了人的思维和自动机之间有着共同的信息规律，因而更加证明了意识是一种特殊物质的机能；第二，运用信息论中的某些原理来解释人的认识过程，可以使人们对认识过程的理解进一步具体化；第三，由于发现了意识思维和自动机器之间的共同信息规律，从而开始揭示出思维现象的秘密，这不仅是对马克思主义认识论的丰富和具体化，同时也是对唯心主义的沉重打击。

第五节 信息方法

70年代以来，由于科学发展的综合整体化趋势，控制论正在向大系统理论和智能科学发展，它们的发展日趋统一，不少学者认为它们已综合为具有一般方法论意义的学科。而信息论是控制论的基础理论，它本身已正在向信息科学发展，信息概念已经渗入各个科学领域，信息方法已经广泛用于各门自然科学和社会科学，具有普遍的意义。因此，也有人认为，信息科学是一门具有方法论特征的学科，已经成为现代科学技术的重要支柱。如果信息科学可以成为一门具有方法论特征的学科，那末信息方法这一概念的含义是什么？它的特点如何？它与各门具体科学方法的关系

系又怎样？作为对各门科学具有最普遍指导意义的唯物辩证法与它又是什么关系？这些都是值得认真加以研究的课题。

控制论的创始人维纳在谈到创立控制论的目的时曾说过，为了研究机体和构成的巨大整体，要寻找新的途径，新的综合的概念和方法。1948年，他在《控制论》一书中，曾用过“信息的方法”这一术语，他说，“任何组织所以能够保持自身的内在稳定性，是由于它具有取得、使用、保持和传递信息的方法。”^①他还以社会为例加以说明，认为一个社会要保持内在的稳定性，对那些反稳定的因素加以控制，最有效的和最重要的是通讯工具。他说，出版物（包括书籍和报纸）、无线电、电话网、电报、邮递、剧院、电影院、学校、教堂都成了取得、使用、保持和传递信息的工具。维纳在这里使用了“信息的方法”这一术语，而对这一术语的含义并未作明确的解释，接着就提出了上述一大串关于通讯工具的名称。所以，就上下文联系起来看，维纳所说的“信息方法”可能是指具体的取得、使用、保持和传递信息的技术方法，或者是指上述具体的通讯手段和工具。这些具体的方法和手段是为了保持系统自身内在的稳定性。尽管维纳在这本著作中应用了信息的观点分析了火炮的自动控制系统，生物个体之间的信息联系以及人对信息的处理和使用，人的认识过程等等，但在当时对于“信息方法”这一概念，他并没有明确的作为一般的科学方法加以提出，也未加阐述。

1955年苏联的C.Л.索波列夫在《控制论的若干基本特征》一文中，明确提出信息的观点具有一般方法论的意义。他说，控制论这门新理论的价值在于它综合了许多不同科学部门的成就，提出了一些普遍的原理和方法问题，并且指出，这个问题的提出在方法论上有巨大意义。他还指出，在控制论中信息这个概念有

① 维纳：《控制论》第二版，科学出版社1963年版，第160页。

着非常广泛的意义，信息是一个新的观点，在自然科学中引入信息的概念和信息量的统一量度的概念，就可以从一个新的统一观点来研究自然界中物体相互作用的各种极不相同的过程。他说，控制论通过信息论将许多不同科学部门——通信理论、滤波器与预告信号理论、追随系统理论、反馈自动调整理论、电子计算机理论、生理学等基本原理——统一起来了，并且将这些科学中的各种不同对象当作信息的处理与传送的系统而从一个统一的观点来研究。从而提出了必须广泛地综括和统一这些科学的成就与方法的问题，因此，在方法论上具有巨大的意义。所以，索波列夫等在这篇文章里，肯定了可将控制论、信息论的一些理论作为一种普遍的原理和方法^①。但是，对于什么是信息方法这个问题，仍然没有比较成熟的和首尾一贯看法。

在我国把信息方法作为一种具有普遍方法论意义的科学研究方法加以介绍的，是1979年出版的《自然辩证法讲义》。书中阐述了信息方法的概念、信息方法的特点和作用。

1. 信息方法的概念。

什么是信息方法？《自然辩证法讲义》认为：“信息方法就是运用信息的观点，把系统看作是借助于信息的获取、传送、加工、处理而实现其有目的性的运动的一种研究方法。”^②

2. 信息方法的特点。

信息方法不同于传统的经验方法，有其自身的特点，这一特点是由于信息科学本身的性质所决定的。信息科学是一门多边缘的横断学科，具有综合性的特点，它研究的是从各种复杂的不同质的系统中抽取出来的统一的信息关系。信息方法的特点是由学

① 索波列夫等：《控制论的若干基本特征》，载《外国自然科学哲学资料选辑》第四辑，第41—50页。

② 《自然辩证法讲义》，人民教育出版社1979年版，第391页。

科本身具有的综合性而决定的。

(1) 以信息为基础,把系统的运动看作是抽象的信息变换过程。信息方法的特点是以信息的运动作为分析和处理问题的基础,完全撇开对象的具体运动形态,把系统的有目的运动抽象为信息变换过程。这就可以从系统对信息的接收和使用过程中来研究对象的特性,研究系统与外界环境之间的信息输入和输出的关系,从而可以把不同的对象加以类比研究。例如,人脑和计算机是两种不同的物质运动形态,如用信息方法去研究,就可以发现它们之间的对应关系和共同本质。人脑由100多亿神经细胞组成,而电子计算机由许多电子器件组成;人脑的神经细胞可以处于兴奋和抑制两种状态,而电子计算机则有接通或断开两种状态;人脑利用神经脉冲从外界获得信息、传递信息、加工处理信息,而电子计算机则利用电脉冲获取、传递、加工处理信息,由于它们具有上述的一般的共同特征,因此可以撇开它们的具体的不同的运动形态,而把它们看作是一个信息变换系统,把其内部运动过程看作是抽象的信息变换过程,从而可以为利用机器模拟或代替人脑的某些功能提供科学根据。

(2) 直接从整体出发,用联系、转化的观点,综合研究系统的信息过程。信息方法与传统的经验方法不同,它不是割断系统的内在联系,用孤立、静止、局部的观点去研究事物,也不是在剖析的基础上进行机械的综合,而是用联系、转化的观点,综合研究系统运动的信息过程,用这种信息方法对复杂事物进行研究时,就不需要对事物的整体结构进行解剖分析,而从其信息的流程加以综合考察,就可获得有关系统的整体性的性能和知识,而用简单的剖析和综合方法则不可能取得。因此,信息方法乃是现代科技领域中研究事物的复杂性、系统性、整体性的一种重要方法^①。

^① 参看周怀珍:《信息方法的哲学分析》,载《哲学研究》1980年第9期,第41页。

3. 信息方法的作用。

关于信息方法的作用，概括起来有以下三点^①：

（1）信息方法揭示了机器、生物有机体和社会物质运动形态之间的信息联系。

客观世界中存在着多种多样的复杂系统，如技术领域中的通信系统、电子计算机系统，有机界中形形色色的动植物系统，社会生活中的经济管理、交通管理系统，等等，利用信息方法进行考察，都可以把它们看作是信息系统，这些系统都存在着信息的接收、传递、处理、存贮和使用的变换过程，我们可以从中发现，这些系统之间有着某些共同的信息联系。

（2）信息方法揭示了某些事物运动的新规律，对过去难以理解的现象作出科学的说明。

随着信息理论研究的进展及其在各个领域的推广，人们可以用信息的观点对某些现象作出科学的说明。如可以用遗传信息的理论说明生物体的遗传现象。又如某些生物群体的活动可以用信息的观点进行解释，蜜蜂通过舞蹈，鸟兽通过鸣叫，发出信息以调节群体的活动，等等。

（3）信息方法又为实现科学技术、生产、经营管理、社会管理的现代化提供思想武器。

人类社会的一切实践活动，都离不开人流、物流、信息流，其中任何一项流通过程发生阻塞、停顿，都会对人类社会的实践活动起破坏作用。其中，信息流的畅通是保证人流、物流畅通的前提条件。信息流调节着人流和物流作有目的、有规则的活动。因此，树立信息观点、掌握信息方法对于实现科学技术、生产管理、社会管理的现代化有重大意义。

4. 信息方法与哲学方法、专门科学方法之间的关系。

^① 参看《自然辩证法讲义》，人民教育出版社1979年版，第392—397页。

随着现代科学技术的发展和对方法论问题的深入研究，国内有人认为现代方法论知识已经形成一个层次分明的体系。各种科学研究方法按其概括程度和适用范围不同，分别属于不同的层次。一般地说，可分为三个层次，即哲学方法、一般科学方法与专门科学方法。

目前，一般把信息方法看作是一般科学方法，具有跨学科的性质，有较高的概括程度和较大的适用范围，属于哲学方法和专门科学方法之间的中介环节。它是唯物辩证法的具体化和实际运用，为唯物辩证法的进一步发展提供丰富的材料，同时也是对唯物辩证法的有力证明。但是对信息方法概念如何理解？有何特点？它与系统方法、控制论方法有何区别与联系？它与哲学方法、与专门科学方法之间的关系究竟如何？也还需要作进一步地深入细致地研究。

第六节 信息论、信息科学 中的方法论问题

信息理论经过30多年来的发展，已由申农的信息论进展到信息科学，随着理论研究的进展，就必然涉及到一系列有关方法论的问题。为了就某些方法论问题加以探讨，首先要看到其研究对象的扩展，因为，在一定意义上，科学方法是由一定的科学研究对象所决定的。研究对象的不同，往往要求采用的方法也不同，这里所说的研究对象的扩展，是指随着科学技术与社会物质生产的发展，信息的内容越来越多地被纳入人们的研究范围之内，如同随着生产力的发展使越来越多的自然资源转化为我们的劳动对象一样。

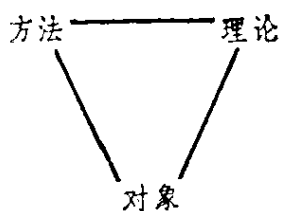
从申农建立信息论以来的30年中，物质生产、科学技术和社

会生活有很大发展，规模日益巨大、日趋复杂，相应的通信系统与各种信息加工系统也必然如此，例如申农当时曾研究过双向通信信道，这是由两个反向的经典模型构成的，毕竟比较简单。而现在则需要对多径信道，多用户网络、多个通信终端、相互干扰信道等加以研究，这就复杂得多。这类信息加工系统一般都是大系统和复杂系统，而且不限于工程技术系统，还涉及生物系统、生态系统、社会系统、智能系统等等。在这些系统中，信息的产生、获取、传递、加工、存贮、使用等等是十分复杂的，因此仅仅研究给定的信源，它所发出信息的统计特性是远远不够的。这就不能不涉及到信息的产生、信息的使用，从而涉及信息的语义和信息的效用（价值）问题。正是由于这种客观需要，使得其研究对象不得不由统计信息向语义信息和有效信息方面伸展。可见，信息科学的产生是与大系统理论、系统工程的发展、系统科学的形成分不开的。正是在这个意义上，信息科学是与系统科学一道发展起来的，两者相辅相成。它们在实质上都以大系统和复杂系统作为研究对象，不过研究的角度不同。这意味着人类认识史和科学史已进入一个新的历史时期，要在新的水平上重新对整体性的对象加以研究，这类对象一般不仅规模巨大，联系复杂，而且具有不确定性的特点，因而研究起来特别困难。与此相联系，方法论问题也就特别突出。

如果说，现代科学技术与社会生活的发展决定了信息科学研究对象扩展的必要性，那么，新的科学方法的出现则使这一扩展具有可能性。

研究对象、科学理论和科学方法之间存在着密切的关系。民主德国的克劳斯曾经从控制论的角度讨论了三者的关系，并作图示如下^①：

^① 克劳斯：《从哲学看控制论》，中国社会科学出版社1981年版，第62页。



从三者的关系中，我们不仅要看到，由于研究对象的不同，会出现不同的理论，而不同的理论就派生出以之为根据的方法；而且更要看到，就开创性的工作来说，针对新的研究对象，有时必须提出开

创性的新的方法来进行探索。

申农信息论的建立，从方法论分析，最主要的有两点：第一是运用了科学抽象与类比的方法，将消息、信号、情报等在各个不同科技领域中的具体概念，加以类比，舍去个性，抽象出共性，从而得到具有一般的、共同的科学概念——信息，才使得对之加以形式化与数量化的处理成为可能；第二，就是针对信息的随机性特点，采用了统计数学的方法。对概率论与随机过程的研究，在数学上已取得了一定的成果，并被作为一种数学工具与方法引入物理学。在40年代，针对控制系统与通信系统所具有的不确定性这一突出特点，无论是维纳还是申农等人都不约而同地从物理学和数学中移植了这种统计方法，这在方法论上是一个重大的突破和创新。可以说，科学抽象与类比方法为申农信息论的建立提供了必要的条件，而把不确定性简约为随机性，并用统计方法加以处理，则可说是具有充分条件的特点。可见维纳等人重视方法论的研究不是偶然的。就科学抽象来说，是科学技术上早就使用了的方法，而类比与统计方法，特别是统计方法使用于这一领域，则是一种具有开创性质的工作。正如一把钥匙开一把锁一样，没有统计方法与类比方法，申农信息论的创立是不可能的。

当然，申农所建立的这一经典模型是对原型大大加以简约的结果。正如申农与韦弗尔早在1948—1949年期间所指出的那样，尽管对信息的研究不能不包括语义和实效性问题在内，但当时仅对技术问题加以处理。这就是说，当时所建立的仅仅是一种对

信息的整体大大加以简化了的统计信息模型。这与当时的科学技术和社会生活水平大体相适应。

显然，这样一种简化的统计模型具有很大的局限性。如前所述，随着大规模的复杂的通信和信息加工系统的出现，信息的产生、信息的语义以及实效性提上了日程。1952年卡尔纳普提出语义信息，1969—1971年期间，先后由贝里斯、高艾斯和皮卡德提出有效信息；1974年哥廷格尔（H.W. Gottinger）提出无概率（主观）信息，詹马利（G. Jumaría）于1977年提出相对信息。此外，继1965年查德提出模糊集之后，1972年德路卡（A. Delucca）和特米里（Termini）的《在模糊集合论基础上的非概率熵的定义》一文，定义了非概率的熵。这是与申农的信息量不同的一种信息量度，从而导致模糊信息与模糊熵的研究。从这些开创性的工作中，可以看出，就他们在引入新的方法方面来看，主要有几种方式：

一种是在原有的数学工具基础上，在已有的有关参量之外引入新的参量。例如在贝里斯和高艾斯提出的“量—质”统一量度信息中，除申农统计模型中的随机事件集 E 及遍于事件 E 上定义的概率分布 P 以外，还引入表示实效性的“有效分布” U 这一新的重要参量。同样，在相对信息中，则把信息与产生信息的信源和使用信息的观察者作为三位一体的一个整体对象，在数学上是作为一个三元组来处理的，由此才导出与观察者相关的四个变量以及相对于另一观察者的相对信息。这些工作表明，由于现有研究对象较原有的为复杂，才不得不引入相应的新的参量。一般说来，在科学技术的发展中推广某项新成果时，往往使用这种方法。但是，这种方法是要受到一定条件限制的，例如，在这里当涉及到的不仅是信息的量，而且要考虑信息的质和主观因素时，就必须研究和探索出新的方法。

第二种情况就是突破了在随机性之上建立的统计数学方法，

而采用了非概率的方法。其中特别值得注意的就是1965年由查德开创的模糊集概念与模糊数学的方法。这样，就可以用非概率的、非统计的方法来建立信息的一种在性质上全新的模型，着重于从质的方面对信息进行定性分析，这对申农的信息论的定量分析来说，是一项重大的突破。而这一突破也是与整个系统科学不仅要量上，也要从质上进行分析是一致的，反映了人类认识史与科学史进入到一个新的时期。必须强调指出，模糊信息与模糊熵的概念，不能理解为与统计信息、语义信息和有效信息相并列的另一种信息。必须看到，一切信息一般说来都具有模糊性的特点。因此，语义信息和有效信息也同样具有模糊的性质，只是在特定条件下我们把它们加以简化，才作为确定的、统计的对象来处理。在一定意义上，我们可以说，从信息论到信息科学是从对统计模型的研究进入到对模糊模型和统计模型的研究。统计方法和模糊集方法是处理熵函数与信息量的两种不同方法，各自分别建立在随机性与可能性的基础上（可能性的概念是查德于1978年在《模糊集合——可能性理论基础》一文中对模糊性的一种解释）。这种可能性测度是对于普通测度特别是概率测度的一种推广，为我们对信息的定性分析提供了一种新的数学工具与方法，因而在方法论上有所突破，使得在从信息论到信息科学的进展中，由统计方法进入到统计方法与非统计方法（包括模糊数学方法）的阶段。同时，我们还必须看到，不确定性的研究是十分复杂的，随机性与模糊性都不过是不确定性的某些情况，因此可以预言，为了从广度上与深度上进一步研究不确定性，还必然会出现一系列新的数学工具与方法，这是因为在现代科学技术中，不确定性的研究在方法论上具有特别突出的意义。如果说，吉布斯等人首先在物理学中考虑随机性这一类特定的不确定性的话，那末，维纳与申农则把这一方法推广于控制与信息的领域。但是，到了60——70年代，这种方法的局限性日益显露。即使现代出现

的模糊数学方法，也有严格的限制，仅仅能处理某些特定的模糊性，而不是任何模糊性。尤其是随着现代科技的发展，在控制论、信息论、人工智能等新兴学科中陆续出现了许多新的方法，如控制的状态空间等等。这样，在方法论中就给我们以重要的启示，还有必要进一步探讨新的数学工具与方法，才能刻划与处理信息科学所提出的一系列新的课题。

第三种情况是类比方法与方法的移植问题。如上所述，信息概念的提出和申农信息论的建立是与类比方法分不开的。一方面，可以在相似性的基础上进行类比，通过科学抽象与概括得到信息的一般概念和共同规律；另一方面，特别值得注意的是推导出来的信息量公式与热力学第二定律的熵公式只差一个负号。从两个在当时看来是完全不同的领域中，所作出的数学推导在形式上竟能如此一致，确实是令人惊奇的。这是一种偶然的巧合？是一种毕达哥拉斯的数的和谐？还是具有深远意义的表征？这在当时是很不清楚的。其后，经过布里渊等人的工作，把信息论与理论物理学领域沟通起来，进一步明确了不定性与不定度的普遍意义。再后，经过普里戈津、哈肯、爱肯等人的工作，提出了耗散结构、协同学理论等新的成果，不仅对普通系统论作出了一定的量的处理，而且把理论物理学与理论生物学沟通起来，带来了一系列重大的哲学与方法论问题，这在方法论上不仅也反映了整体化的趋势，而且深刻地揭示了统一性与相似性的内在联系。类比方法与方法的移植，其客观的根据正是在于这种统一性和相似性。这一科学事实及其进展一方面把信息论、物理学、生物学、普通系统论等学科联系起来了，另一方面也使我们深刻地理解到，为什么能把本来在物理学领域运用的统计方法移置于信息论的研究。

但是，物理学中的某些其他规律和方法是否能够推广到信息科学中来呢？这要作具体分析。詹马利将爱因斯坦的相对性原理

和洛仑兹变换推广运用于相对信息问题。这在方法论上是值得引起重视的。毫无疑问，信息是与时空相关的，在原则上它们应遵循物理学的相应规律，甚至如侃特（Cantour）已经认为信息是物理状态的基本量，用信息守恒的概念可以统一相对论和量子力学中的很多观点^①。但具体能运用那一个规律则是要慎重的。因此，在詹马利那里，将外熵 $H_0(S|R)$ 对等于运动学中的“时间”，将内熵 $H_1(S|R)$ 对等于“距离”，而二观察者 R 与 R' 之间有如下的关系，即：

$$U = \frac{dH_1(R|R')}{dH_0(R|R')}$$

其中 U 就对等于“相对速度”，这样种类比的客观根据是什么？更值得考虑的是在观察者之间为什么能推广运用爱因斯坦的相对性原理和洛仑兹变换？这种方法移植的客观根据又是什么？作为一种新的科学理论与方法，必须等待实践的检验，也需要深入探讨。如果这一成果不是一种大胆的假设或无根据的外推，那么，就很可能具有十分深远的意义。当然这还有待于进一步的研究。

无论是关于信息量公式的研究还是相对信息的问题，都从信息论与信息科学的角度，说明了类比方法和方法的移植问题对于促进现代科学技术的发展起了十分重大的作用。从模型方法、模拟方法到现代的功能模拟方法，都是建立在类比方法的基础之上的。在有些情况下，这些方法推进着科学技术的迅速进展，而在另一些情况下，却会出现不合适的甚至错误的外推。为了对之加以判别，除了有赖于科学技术本身的发展和实践的检验以外，还要对类比方法与方法的移植的客观依据进一步加以探讨，更要认真探讨类比和方法移植的界限和条件，从中找出一般的规律和判定的法则。这是方法论研究中应予解决的新课题。

① 参看Cantour, 《Information Mechanics》, 1977.

第三篇 系统科学的基本概念 与哲学、方法论问题

本世纪40至50年代期间，在控制论、信息论与电子计算机出现的同时，还出现了系统工程（systems engineering）、运筹学（operational research）和一般系统论（general system theory，又译为普通系统论）这样一些新的科学技术分支。其中，系统工程属于技术科学，运筹学属于应用数学，与系统工程密切相关；而一般系统论则与理论生物学和哲学密切相关。这些学科基本上是独立形成和产生的，但它们之间及其与控制论、信息论、计算机科学技术之间的联系是十分密切的。我们可以把它们看作一组有着内在联系而又密切相关的科学群。这些新的学科虽然基本上属于技术科学的领域，但又必然与理论基础科学相关，就是说，它们必然要有相应的基础科学，要探讨有关的基础理论问题，与哲学、方法论也必然相关。并且，这些技术科学的应用范围日益扩展，除了工程技术领域以外，还推广到生物科学、社会科学、智能科学的领域，使得数学、工程技术、自然科学与社会科学、智能科学之间出现了相互渗透的趋势。这是前所未有的一个突出特点。

与这种发展趋势相联系，到了70年代前后，国内外学术界一般认为在系统工程的基础上，出现了系统科学。在哲学界（尤其是我国和苏联的学术界）提出了关于系统论的研究问题。但是，无论国外或国内，对于什么是系统论是有不同理解的。系

统论的内涵和外延也很不清楚。国内哲学界有时将控制论、信息论和系统论三者合称为“三论”，至多只是作为一种简称。仔细分析起来，系统论这个术语的用法是相当广泛而又混乱的。本书将在第十五章第一节中把当前国内外学术界对系统论的不同理解作一些概述（当然不可能是全面的）。这种不同的理解是任何一类新兴科学在形成过程中的必然而正常的现象。在这种情况下，只能采用某些较易取得一致的看法。这就是从这一组，或者说从这一群有关系统研究的科学技术出发，就其历史发展的事实来说明系统研究的形成过程及其有关的问题，总称为系统科学，而不给出系统科学的某种定义。可以肯定地说，系统科学的形成是与系统工程、运筹学、一般系统论等学科密切相关的。因此，本篇将简略地论述其基本概念以及有关的哲学和方法论问题。推而广之，系统科学也是与上述的控制论、信息论和电子计算机科学技术密切相关的。如果把所有这些学科看作一个科学群的话，那么它们又都是与系统研究有关的。因为作为系统科学，不论如何理解，它至少而且必然与系统研究有关。也可以说，本书在实质上是把系统科学理解为与系统研究有关的科学技术和哲学理论的总体系。

第十一章 系统工程和运筹学 的形成与产生

系统工程和运筹学是我国实现四个现代化的一种必要而强有力的工具。系统工程主要以人工系统为研究对象，把它看作一种具有有机联系的统一整体，运用现代科学技术方法进行系统分析、系统设计、系统模拟，作出合理决策，以便最优化或次优化地实现预期的目标，因而具有重大的实际意义。

系统工程和运筹学的基本思想与方法并不神秘，在人类长期的实践过程中早已逐步形成和加以运用，但只有与现代科学技术和系统思想的成果相结合，才逐步形成并产生系统工程与运筹学这类新兴的学科。

系统工程和运筹学的形成与产生，首先是现代生产力发展的必然产物。现代生产发展的趋势是，一方面职能分工愈来愈细，另一方面生产的社会性愈来愈强，生产与科学实验的规模也愈来愈大。这样一种两极分化的趋势要求高度的协调与统筹安排，才能保证整体的统一性与高效率实现预期的目标。系统工程与运筹学正是为了解决这类问题而形成与产生的。

其次，是现代社会的规模与实践活动的大型化和复杂化的必然产物。现代社会所具有的信息化特点（即所谓信息化社会）要求对社会、经济领域进行定量的系统分析与处理，以便领导与管理机关作出合理的决策。

最后，上述的社会生产、科学实验与社会实践活动的需要，

使系统工程与运筹学的产生具有必然性，而现代科学技术的成果则使其实现成为可能。数学（特别是作为应用数学的一个分支的运筹学）、控制论和信息论是分析与处理复杂系统的一类基础理论与工具，电子计算机的出现和现代计算机科学的发展，为系统工程实现精确的数据处理提供了精确高速的运算工具和模拟手段。如果没有现代的基础理论和现代化运算工具的发展，要实现复杂系统工程中设计决策、运转、控制和管理优化是不可能的。

系统工程的产生和发展有它自身的历史过程。系统工程的基本思想来源于古代人类的社会实践经验。例如我国古代战国时期，秦国李冰设计修造了伟大的都江堰水利工程，包括“鱼嘴”岷江分水工程、“飞沙堰”分洪排沙工程、“宝瓶口”引水工程三大主体工程 and 120 个附属渠堰工程。工程之间的联系处理得恰到好处，形成一个协调运转的工程总体。这可说是古代的一项系统工程的范例。这类事例很多，在此不多列举。

现代系统工程的形成，开端于本世纪的30——40年代。从历史发展的事实来看，系统工程的形成与运筹学、控制论、信息论和电子计算机的出现有着共同的历史背景。在这个时期，与人工系统的定量研究有关的探讨除系统工程与运筹学以外，还有以1911年由美国工程师泰罗（F. Taylor）发表的《科学管理原理》一书为前导而逐步形成的管理科学（management science），与系统工程密切相关的系统分析（systems analysis）、系统研究（systemes research），与计量经济学有关的费用-效果分析，等等。这些术语没有十分明确的使用界限而彼此又密切相关。关于系统工程的设想，美国无线电公司早在30年代为了开展广播工作就已感到这种必要性，系统工程这一术语，一般认为是1940年由美国的贝尔电话公司为了统筹安排微波通讯网而提出的。系统工程受到广泛的重视与应用主要是与战争有关，特别是与第二次世界大战密切相关。系统工程与运筹学是紧密地联系在一起发展起

来的。虽然对于系统工程与运筹学的区别和联系存在着不同的理解，但大体说来，不妨把系统工程看作有效地实现各类人工系统的战略布署，而把运筹学理解为保证这种战略布署得以实现的战术考虑，因而运筹学成为系统工程的基础理论与数学工具，这种比喻有助于我们理解这二者间的关系。本书将这二者联系起来，考察其形成、产生与发展的过程。

在古代战争史上，达·芬奇、伽利略等人曾用科学方法进行过战争行为的分析研究。在近代，苏格兰的克拉克（J.Clerk）在1782年发表过海军战术的论文，研究如何使我方舰只的暴露为最小而对敌方舰只的火力攻击效果为最大的问题。1811年，普鲁士的冯·莱斯维提出过对策模拟方法。所有这些都属于对作战进行定量分析的早期探讨。在第一次世界大战期间，英国数学家、工程师兰切斯特（F.W.Lanchester）对空战进行过数学分析，给出了作战格局的简化数学模型，并对战局的概率分布进行过预测。著名的发明家爱迪生（T.A.Edison）则用博弈方法设计了商船回避潜艇攻击的最优航行方法。美国教授莫尔斯（P.M.Morse）研究过护航队的损失模型。美国的生理学教授希尔（A.V.Hill）研究过高射炮的实效问题，并领导了英国国防部的防空试验小组。由于他在第一次世界大战和两次战争期间作出的卓越贡献而被称为“运筹学之父”。

在上述工作的基础上，针对第二次世界大战期间军事力量的对比情况，系统工程与运筹学得到了广泛的研究与发展。战争初期，盟国在军事力量上处于劣势，为了对付德国法西斯的军事优势，不得不采取一套科学的对策方法。系统工程与运筹学在当时是为了解决这个重大课题而发展起来的。根据系统工程的基本思想，要从整体出发来考虑敌我双方现有的和后备的装备与人员情况，使得整个雷达系统、防空系统、护航系统、后勤系统、军事指挥系统统一协调起来以达到最高的效率，取得战争的胜利。为

了实现这个目标，不仅要有优化的战略布署，而且要借助数学工具如运筹学等来定量地加以巧妙安排。

第二次世界大战前夕，英国已开始研制雷达，并取得成功。1938年英国在东部沿海地区已开始设置一些雷达站作为空防的第一道防线，以对付德国法西斯的突袭。英国在1938年7月举行过一次重要的防空演习，但暴露出一个严重的新问题，就是从增设的雷达站接收到的一些信息有时会因相互矛盾而需要进行协调。为了有效地建立空防系统，还必须研究雷达系统与其它防空部门的协同作战问题。因此，演习一结束，英国马上开展对雷达系统运用方案的研究，研究控制人员如何处理雷达网和皇家观察队提供的信息，研究战斗机编队对付轰炸机编队的控制技术，研究单一战斗机对付单一轰炸机的控制技术，等等。1939年夏天，英国举行了战前的最后一次防空演习，演习表明防空警戒和控制系统的运用有很大改进。当时担任英国空军部防空科学调查委员会主席的铁寨（H.G.Tizard）还组织一些科学家研究运用雷达指挥空战，并对有关的操作提出了很好的建议。由于上述成就，作战研究部主任罗威（Rowe）把这些工作称为运筹学。1940年成立了以物理学家白兰克特（P.M.S.Blackett）为首的运筹学小组。这个小组不仅研究了防空系统如雷达与战斗机的部署与控制，而且还对今后作战的结局作出了估计，对决策工作起到了一定的作用，对其后的一些战役作出了重大贡献。1942年，在反对德国法西斯的潜水艇战斗中，由于研究了深水炸弹最优的起爆深度，使击沉率提高4—7倍。

在美国陆军部的作战分析小组，将这类工作称为系统分析。

运筹学与系统工程的研究与应用是密切相关的。第二次世界大战初期，英国处于战略防御阶段，在装备与人员素质上均处于劣势。英国本土遭受到德国空军的频繁袭击，海上受到德国飞机

与潜水艇的封锁。在这种情况下，为了变战略防御为战略进攻，必须将有关的各种战斗与后备系统进行整体性的分析与处理。这就是系统工程的课题。系统工程的研究证明，必须合理选择目标，才能提高效率。例如，当时英国的海运受到德国空军很大威胁，迫使英国除了海上运输船舰本身配备高射炮外，还派了许多护航舰，航行中的作战目标最初定为如果敌机轰炸运输船舰，就击毁敌机，但这一目标使货运效率降低，货船损失很重，后来，将作战目标改为击溃，才使货运效率大大提高。从这里清楚地看到效率同一定的目标有关，同一定的整体性有关^①，这一点和控制论是很一致的。对于一个有多因素影响的、具有多个目标的大系统来说，要解决合理选择目标这类优化问题是很复杂、很困难的，必须进行定量的分析与研究。为了保证实现优化，对其中有关因素的使用也必须进行定量的与优化的分析与处理。所以，运筹学也要发挥很大的作用。当时，英国战斗机的数量少，不仅要用来抵御德国飞机的袭击，还要用来护航。因此，飞机的使用率是一个重要的问题。以戈登（C. Gordon）博士为首的英国沿海防御运筹小组研究了护航飞机的使用情况，找出使用与维修的合适关系，使海岸司令部出动飞机的架次几乎增加了一倍，对大西洋战役作出了重大贡献。

上述事实表明，系统工程与运筹学是在第二次世界大战期间为了战争的需要而发展起来的，它当时主要是一类军事系统工程和军事运筹学。这是不奇怪的。这种与竞争、战争有关的战略与战术的分析，以及如何合理使用与组织力量，变劣势为优势、转败为胜的事例是很多的。例如我国战国时齐王和他的大将田忌赛马的故事，就是一个很好的古代运筹学的例子。齐王马好，田忌马差。如果分别以上、中、下三等马相比，田忌必败。当时著名

① H. Goode, R. E. Machol, 《Systems Engineering》, 1957.

的军事家孙臆为田忌出主意：“今以君之下驷为彼上驷。”终于三赛两胜，转劣为优。有人发现在我国先秦诸子的著作中就有一些类似的运筹学思想。我国将“operational research”译为“运筹学”是出自《史记·高祖本纪》中“夫运筹帷幄之中，决胜于千里之外，吾不如子房”，后来以“运筹帷幄”指策划机要，作出决策。筹是策划，帷幄是军中的帐幕，其本意是指在军帐内对军事问题所作的全面策划。由此不难理解，1945年美国成立的兰德（RAND）公司在当时就是为空军提供参谋咨询的。

在总结战争期间的研究成果与实践经验的基础上，1946年美国的莫尔斯（P.M.Morse）和基博尔（G.E.Kimball）在内部发表了保密文献，到1950年才公开出版《运筹学方法》这一专著。1957年古德（H.Goode）与迈克尔（R.E.Machol）出版了《系统工程学》这一专著。这两部著作可以说标志着这两门新兴学科的产生。此外，美国的麻省理工学院在1948年第一次开设了系统工程课程。

战后，这两门学科继续在军事方面得到广泛的应用。由于对系统工程的研究，促进了美国军事力量的发展。1957年，美国进行研制导弹核潜艇的北极星计划，原计划6年完成，由于运用了系统工程，结果提前两年完成。在执行这个计划中，组织了专门力量，研究出了“计划评审技术”（PERT），实际上也就是一种网络系统分析。因为任何一个计划，无非是使物质流、能量流、信息流组织得最合理以达到最优化。可以举一个简单的例子，如盖一个房子之前，挖地基需用12天，运料需用6天，为建筑工人盖工棚需用11天，设计图纸需用15天，这些都准备好了才能开工，这里有物质流，也有能量流和信息流。把所有的关系都用网络图表示出来，进行量的处理，我们就能找到一条最优的途径以便多快好省地安排工作。这就是“计划评审技术”研究的核心问题。这就要找到一条优化的关键路径。实际上，也就是设计出一

种流程图，使物质流、能量流、信息流通过网络分析达到最优效果。这是一种最简单的情形，而对于象北极星计划那样一种庞大复杂的系统，不运用应用数学和计算机，根本不可能考虑解决它的最优化问题。

除了军事方面的应用以外，系统工程与运筹学还日益广泛地应用到其它方面。首先是用于大规模的尖端科研系统，如1961—1972年登上月球的阿波罗计划，参加人员至少约有42万，由120所大学实验室和200多家公司从事研制，耗资达240亿美元。为了统一指挥与协调如此巨大的科研项目，运用了系统工程与运筹学方法，节约了资金，提高了效率，提前完成了计划，在1969年7月16日发射阿波罗11号宇宙飞船，将两名宇航员送上了月球。

其次，从60年代开始，特别是在70年代，系统工程与运筹学还日益广泛地应用于生态平衡、人口问题、社会经济与行政管理等方面。比较典型的例子是南朝鲜在国际开发总署派驻的顾问团建议下，运用系统工程与运筹学方法编制与实施第一个五年计划（1967—1971）。1970—1974年间，墨西哥政府与世界银行合作制订改造农业的计划（又称绿色计划），均取得了显著的经济效益。

系统工程与运筹学的广泛应用，使得越来越多的国家分别进行了系统方面的研究，有关著作相继出版，应用系统工程的领域日益扩大，相继产生了许多不同的应用系统，如下页表①所列。

我国对系统工程、运筹学的研究和运用起步较晚。1955年，由于我国有计划按比例的经济建设十分需要系统分析，开始引进运筹学。

1956年，在中国科学院力学研究所建立了我国第一个运筹学研究组，1960年中国科学院力学研究所与数学研究所的两个运筹学研究室合并成立数学和运筹学研究所。1960年，1962年先后两

① 寺野寿郎：《系统工程学》，机械工业出版社1980年版，第5页。

工业系统	生产过程系统	最优设计、最优控制、过程模拟、分级控制、自动启动……
	网络系统	交通、电力、通信、管路配置、分配、安全回路、控制回路、情报网……
	其它	机场管制、宇宙开发、地区冷暖房的自动化、建筑业、机械人……
管理系统	经营	经营管理、经营模型
	计划	计划、规划、预算系统、调度、计划……
	信息管理	情报检索（图书、法院、警察）生产、研究销售、库存等管理、信息管理系统……
服务系统	预约业务	铁路、飞机的座位、旅馆……
	银行、证券业务	联机自动化……
	邮局	自动分拣……
	职业介绍	中央管理
社会系统	经济	流通市场、经济模型、工业动态学、资源分配……
	国土	城市设计、地区开发、公路计划、公害、城市计划……
	教育	教育组织、教育机构……
	国防	半自动化地面防空体系，BAGE、夸克（美国一种地对空导弹）……
人体系统	生理病理	分析、模拟……
	脑神经心理	神经细胞模型、思维模型、图谱识别、自动翻译、对策模拟、人工智能……
	治疗	自动诊断、医院自动化、假手、假脚、人造内脏……
自然系统	气象	天气预报、台风、防洪措施……
	地震、火山	防灾……
	河流、海洋、土地	水库流量控制、工农业用水、海洋开发、养殖…… 土地利用、地下资源……
	农、林业	计划、自动化、生态学……

次召开全国性运筹学会议。1962年钱学森开始倡导以系统工程思想为指导来从事国防工业的研制和生产。60年代中期到70年代初期，华罗庚在我国大力推广“统筹法”、“优选法”。这些工作为运筹学在我国的发展奠定了基础。十年动乱期间，系统工程学的发展陷于停顿。粉碎“四人帮”后的1977年才正式把开展对系统工程的研究列入国家重点科研项目。1978年9月27日，钱学森发表了《组织管理的技术——系统工程》一文。1979年6月，中国管理现代化研究会在天津召开系统工程交流会。1979年7月，中国自动化学会在芜湖召开系统工程学术讨论会，其间中国科学院系统科学研究所成立，并且成立了我国第一个系统工程学会。近些年来，我国科学和哲学界广泛开展了系统科学的学术研究活动，系统工程和运筹学的研究和运用在我国出现了一个新的局面，这将大大促进四个现代化的进程

第十二章 系统工程的基本 概念与方法

第一节 系统概念及其特点

要弄清楚什么是系统工程，首先要弄清楚什么是系统。系统，是关于系统的研究的各个学科所共同使用的一个基本概念，当然也是系统工程的一个基本概念。

钱学森曾经引用恩格斯的一句话，“一个伟大的基本思想，即认为世界不是一成不变的**事物**的集合体，而是**过程**的集合体”^①。并指出“集合体”就是系统，“过程”就是系统中各个组织部分的相互作用和整体的发展变化。他认为恩格斯早就给予系统概念以明确的含义。钱学森提出：“把极其复杂的研究对象称为系统，即由相互作用和相互依赖的若干组成部分结合成具有特定功能的有机整体，而且这个系统本身又是它们从属的更大系统的组成部分。”^②贝塔朗菲则定义为“系统是处于一定相互联系中的与环境发生关系的各组成成份的总体”^③。

尽管从不同的角度可以对系统作不同的理解和给出不同定义，但一般认为由两个以上的因素组合而成具有一定结构的整体

① 《马克思恩格斯选集》第4卷，第239—240页。

② 钱学森、许国志、王寿云：《组织管理的技术——系统工程》，载《文汇报》1978年9月27日。

③ 贝塔朗菲：《一般系统论》，载《自然科学哲学问题丛刊》1979年第1—2期。

就可看作是一个系统。说得确切些，系统是由具有相互联系、相互制约的若干组成部分结合在一起并且具有特定功能的有机整体。这些组成部分通常被称为子系统，而这个子系统本身又可以看作为它所从属的那个更大系统的组成部分。在这个意义上，系统与子系统之间具有相对性。所以，1967年日本的工业标准JIS中，将系统定义为：“许多组成要素保持有机的秩序，向同一目的行动的东西。”

根据系统的不同性质和特点，可以将系统加以分类。由于角度的不同，分类可以是多种多样的。

从系统工程的角度来进行系统的分类，首先要将系统分为自然系统与人工系统（也称人造系统）。前者是指本来就已存在着的、由自然物组成的系统。后者是指经过人的有意识的实践活动的创造而出现或组成的系统。这又可分为三类：

- 1.人们对自然物进行加工而获得的系统；
- 2.在一定社会历史条件下，人们所组成的一定的社会系统；
- 3.人们对自然与社会进行认识而建立的科学理论体系。

从这三类系统中，可以看出，系统又可分为实物系统与概念系统，科学理论系统属于概念体系。就系统工程来说，在运用系统工程的理论与方法论时，当然要用到概念系统，但就系统工程的研究与处理对象来说，主要是人工系统或经过人们加工了的自然系统，即前两种人工系统。事实上，大量的系统是自然系统与人工系统相结合的复合系统。

系统工程以研究人工系统为主，在这类系统中往往要包括人的因素在内。

上述特点表明，当一般的系统概念运用于系统工程中时，必然具有其本身的特点。为此，我们在系统工程中运用系统概念时还要注意到下列的一些特点：

- 1.全局性。这是系统概念中最重要的特点。同以前那种见林

先见树的分析方法相比，它是见树先见林。也就是一事当前，先从整体考虑出发，提出目标。在确定目标前提下，再从整体出发考虑与各层子系统的关系，最终体现在实现目标这一点上。系统是由很多部分组成的，系统的目的或特定功能也要由很多目标或指标来综合形成。因而必须从全局出发，而不能单从某一部分、某一个指标来思考和解决问题。

2.关联性。系统内部各个子系统之间都存在着有机的联系，如系统的输入与输出之间的关系，系统之间的层次联系，系统的所有组成部分中的参数和变量与系统特定功能之间的关系，这些都表示着系统的相互作用和相互依赖的有机联系。因此，我们必须设法从量上进一步描述这种相互关系——关联性。如结构网络模型分析，就要利用图论等数学工具的一些知识，把系统中某些部分的结构联系清晰地表达出来。

3.择优性。研究一个系统的核心问题就是要解决它的最优化问题。我们设计、制造和使用系统的最后目的是要它完成特定的功能。这就要求完成的效果最好，也就是要达到最优计划，最优设计，最优控制和最优管理，最优使用。简言之，就是应该选择优化的系统方案，以便作出决策。这就需要使用最优方法，最优控制理论和决策论等。

4.综合性。由于近代复杂的大系统涉及面宽，不但有技术因素，还有经济因素、社会因素等，因此，只用少数几门学科的知识是不够的，还需要数学、生物学、社会学、经济学、信息论、控制论、心理学、哲学等多方面的学科知识。系统工程非常强调集体智慧，强调脑力劳动社会化，需要有各方面的专家、领导和实际操作人员一起参与，共同讨论研究问题。

5.实践性。与马克思主义哲学相一致，系统工程强调要改造世界，其特点在于引导人们按照世界本身固有的客观联系来改造世界，离开实践，离开具体的项目和工程就谈不上系统工

程。当然，系统工程并不排斥对系统本身作理论和规律的探讨。

第二节 系统工程的基本概念

在说明了系统概念及其运用于系统工程的特点之后，就能进一步理解系统工程的定义与基本概念。

什么是工程？我们通常所理解的工程是土木工程，水利工程，建筑工程等等。系统工程并不是讲的这一类具体的工程，而是指用定量化的系统方法处理大型复杂系统，进行系统的组建、系统的经营管理，这些都可以看成是某种工程实践，因而系统工程的工程概念是一个含义很广泛的概念，把它理解窄了不行。工程这个词18世纪出现在欧洲，专指作战兵器的制造和执行于军事目的的工作。以后才引伸出一种比较普遍的含义，把服务于特定目的的各项工作的总体称为工程，如水利工程、土木工程、灌溉工程等。如果这个特定的目的是系统的组织建立或者是系统的经营管理，就可以看作是系统工程。国外所说的运筹学、管理科学、系统分析、系统研究以及费用效果分析的工程实践内容，均可以用系统的概念统一归入系统工程。所以，系统工程就是从系统的认识出发，设计和实现一个整体以求达到我们所希望得到的效果。系统工程就是合理进行开发设计时所运用的思想原理、方法、步骤、组织技巧的总称。

系统工程包括许多门工程技术，是一大类工程技术门类的一个总称。因体系不同，还可以再分门类。如：农业系统工程，军事系统工程，后勤系统工程，经济系统工程，工程系统工程，行政系统工程等等。所有这些系统工程的共同特点是：“把定量化的系统思想方法应用于组织管理的工程实践，寻求实践效果的优化。”^①换句话说，我们可以把它概括为这样几点：整体性观

① 王寿云等：《系统工程名词浅释》，科学出版社1982年版，第6页。

点，层次性关联，协调性原则，科学的管理，最优化的目标。整体性观点就是把研究的对象视为一个系统，当做一个整体来处理。层次性关联就是力求使整个系统具有多层结构，不但系统中各层之间有关联，而且同层各小系统之间都要彼此关联。协调性原则，就是上下层次之间与各系统之间都要彼此协调，以求达到整体系统的最佳运转。科学的管理就是最有效地组织与控制信息流，使系统的研制过程或运转过程在时间上、经济上、效果上始终处于优化状态。优化目标就是我们对所创造的系统或被改造的系统提出最理想目标，它们可以是单目标的，但一般是多目标的。

根据上述的分析，我们不难理解系统工程的定义。这类定义是很多的，也是各自从不同角度给出的。我们仍采用日本工业标准 JIS 所给出的定义：“系统工程是为了更好地达到系统目标，而对系统的构成要素、组织结构、信息流动和控制机构等进行分析与设计的技术。”

与系统工程有关的基本概念首先是系统概念。这在上一节中已经加以论述。在系统工程中主要是要研制出新的人工系统，或是对自然系统进行人为的加工以达到预期的目标。但系统工程对这些系统的研究必须是定量的。因此，必须研究系统的模型，其中不仅要有网络模型，而且更重要的是力求完善地建立其数学模型。所以，模型是系统工程的另一个基本的概念。大家知道，量化的目的是为了优化地实现目标。这是系统工程的目的，因此优化也必然是系统工程的一个基本概念。正是为了实现优化，必须运用运筹学这一强有力的数学工具。这表明了系统工程与运筹学具有内在的不可分割的联系。由于系统工程所研究与处理的对象一般是大系统，而且往往是复杂系统，有关的因素、参量不仅多，其目标也往往是多个的。因此，为了优化地实现目标，必须对所提出的数学模型运用计算机进行仿真，所谓仿真，就是用计

计算机对已建立的数学模型分别不同条件与情况加以测试与预测，以便比较多种方案，从中选择最优的或次优的方案，作出决策，才能使系统投入运转。所谓决策，就是要从某些可能的状态或方案中，根据给定的目标，选择出优化的状态或方案，决策与仿真、优化是不可分的，决策是系统工程中的一个起着重大作用的基本概念。

这样，在系统工程中一般要包括如下的一些内容：

1. 系统的模型化与仿真技术（这与系统分析与系统模拟等有关）；
2. 系统的运筹与优化技术（这与运筹学、最优化理论等有关）；
3. 系统的设计、评价与可靠性；
4. 系统管理技术。

上述内容的具体细节不属本书论述范围，读者可以参阅有关的专著。以下简略地将其分析与处理人工系统的方法说明一下。这种方法，在不少专著中称为系统工程的方法。

第三节 系统工程方法

系统工程作为一门新兴的技术科学，它的一个突出特点是提出了一整套分析与处理人工系统的方法。钱学森指出：“系统工程是组织管理系统的规划、研究、设计、制造、试验和使用的科学方法。”^①在后一种意义上，它可以称为系统工程的方法。在此，首先论述一下作为一种具体科学方法的系统工程方法。

系统工程是各类人工系统组织管理技术的总称，对于各种不

^① 钱学森、许国志、王寿云：《组织管理的技术——系统工程》，载《文汇报》，1978年9月27日。

同的系统工程，可以找到一套具有共同性的思路或方法、程序，

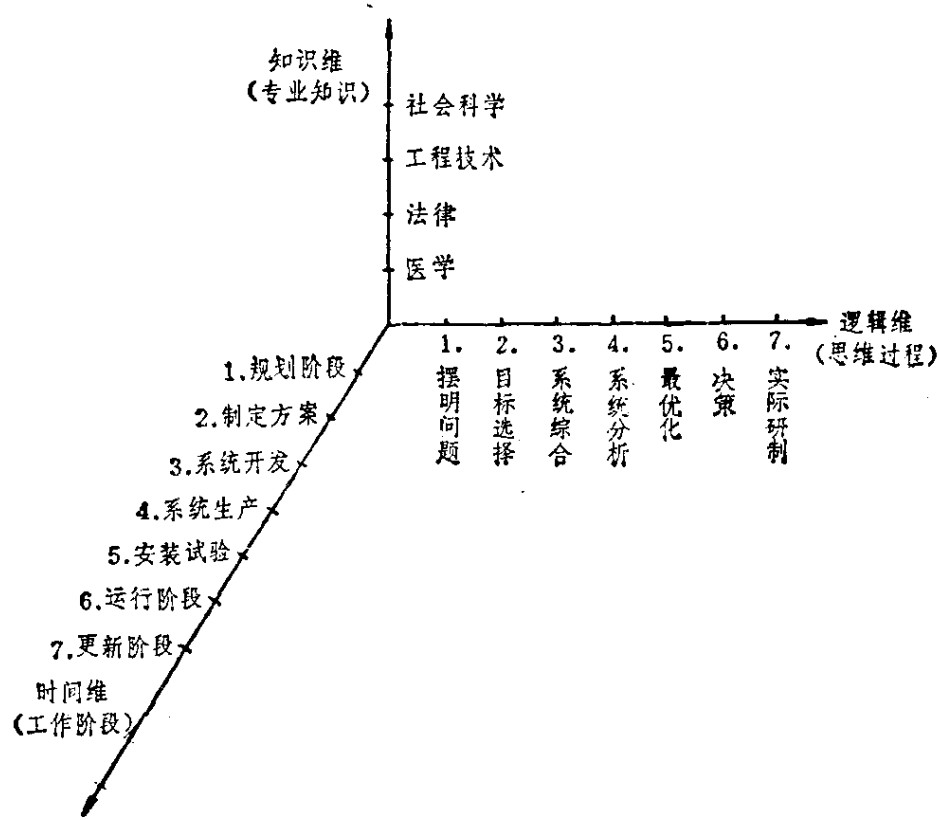


图12·1 霍尔的三维结构图

我们把它称之为系统工程方法。由于所取的角度不同，可以提出不同的方法，一般公认霍尔（A.D.Hall）在1969年提出的三维结构是比较通用的一种系统工程方法。如上图所示，它用时间维、逻辑维和知识维这三维，描述在不同阶段所要采取的步骤以及所要用到的有关科技知识。

在上图中指出了在 7 个不同时期的阶段中所要采取的逻辑步骤。如果把它们综合在一起，就构成霍尔的系统工程活动矩阵。

根据霍尔关于系统工程的三维结构和活动矩阵，我们可以将系统工程方法看作是由系统分析、系统模拟、系统设计、系统管理这些主要环节组成的过程。

系统工程所要研制的系统一般是规模巨大而复杂的大系统，其中包括很多子系统或因素，它们以及它们之间的关系可以是确

步骤 进程 (逻辑维) (时间维)	1.摆明 问题	2.目标 选择	3.系统 综合	4.系统 分析	5.最优 化	6.决策	7.实施 计划
1.规划制定	a_{11}	a_{12}				a_{16}	a_{17}
2.初步设计	a_{21}						
3.研 制							a_{37}
4.生 产				a_{44}			
5.安 装							
6.运 行	a_{61}						
7.更 新	a_{71}	a_{72}				a_{76}	a_{77}

图12·2 霍尔的系统工程活动矩阵

定的，也可以是不确定的，还可以是互相矛盾的。系统工程的目的的是要使人工系统达到一种整体性的优化目标。因此在确定这种目标之后，首先必须进行系统分析。系统分析是系统工程中的首要步骤，也可以说是起核心作用的步骤。因此，在一些早期的论著中往往将系统分析看作是系统工程的同义语。系统分析的步骤包括系统目的的分析和确定、系统的模型化、系统的最优化和系统评价这几个主要的步骤，其目的是要定量地给出系统模型，评价系统的功能与效益特性，以保证最优设计和最优管理的实现。

系统模拟是在系统分析提出初步的系统模型之后，用电子计算机对其数学模型进行仿真，以便比较不同的方案，进行决策分析，作出优化决策。

系统设计最初是由民主德国的纳德勒(G.Nadler)所倡导的，又称IDEALS，即对系统的有效而合乎逻辑的理想设计(Ideal Design of Effective and Logical Systems)。理想设计是个重要的概念。在系统设计中，要考虑系统目标的实现所必须的约束条件，设计出理想系统，然后经过一些途径进行评价与修正，使之合乎现实的约束，建立技术上可以实现的系统。所以系统设计是与系统模型、仿真、决策相关的，其目的是根据系统分

析与系统模拟所作出的决策提出能在技术上实现的优化设计。下一步才能转入系统的研制、施工或运转。具体说来,在设计新系统时,第一步,把系统要实现的功能作为系统的目标,提出约束条件。设计人员根据这些条件和各种环境因素进行实事求是的分析与评价,设计出有可能实现的几种方案。第二步,对这些方案再做出分析,选出最优方案,并且还要提出评价优化方案的决定准则。第三步,就是具体设计、详细设计出最优方案的系统。最后是进行系统的研制、试验和评价,看系统是否达到预期结果,发现不当之处就及时改正,直至实现或接近理想设计为止。

由此可见,系统分析、系统模拟、系统设计、系统管理是实施系统工程方法的几个重要环节。只有对系统进行详尽的综合分析,掌握系统的功能、目的、结构、信息量、系统内部诸要素的关系,我们才能认识系统。在此基础上我们才能进行系统模拟。系统模拟是系统分析的进一步总结、概括,是系统分析的理论化、系统化、具体化。最后我们才能进行系统设计和系统管理。这几个环节并不是孤立的,而是互相渗透的,系统分析贯穿于系统模拟、系统设计始终。为了说明其关系,用简图表示如下:(图见下页)。

在运用系统工程方法进行系统分析时,最关键的步骤是建立有关系统的数学—逻辑模型,以便通过电子计算机或相应的手段,比较并选择最优方案,作出决策。现在仿效哥达尔(D.V. Goodall)提出的一个牧场生态系统能流数学模型来简要地加以说明^①:

首先,我们把这个牧场划分为三个分室(即子系统,在生态学研究,常用分室模型。可以把分室理解为子系统)即绿色植物、肉食动物、居民、分别用 $x_1(t)$, $x_2(t)$, $x_3(t)$ 表示其相应的态(即每个分室的能量)。再对每个分室进行生态学的研究,查

① 参看D.V. Goodall, 《The Hierarchical Approach to Modeling Building》, 1976,

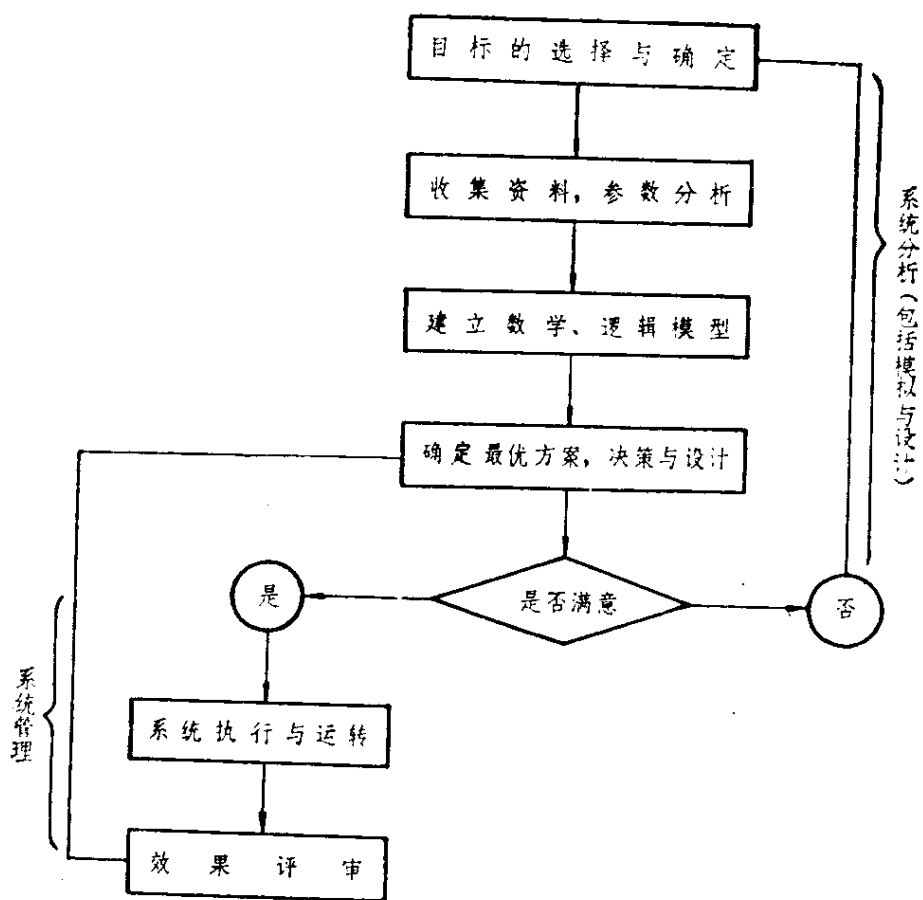


图12.3 系统工程方法示意框图

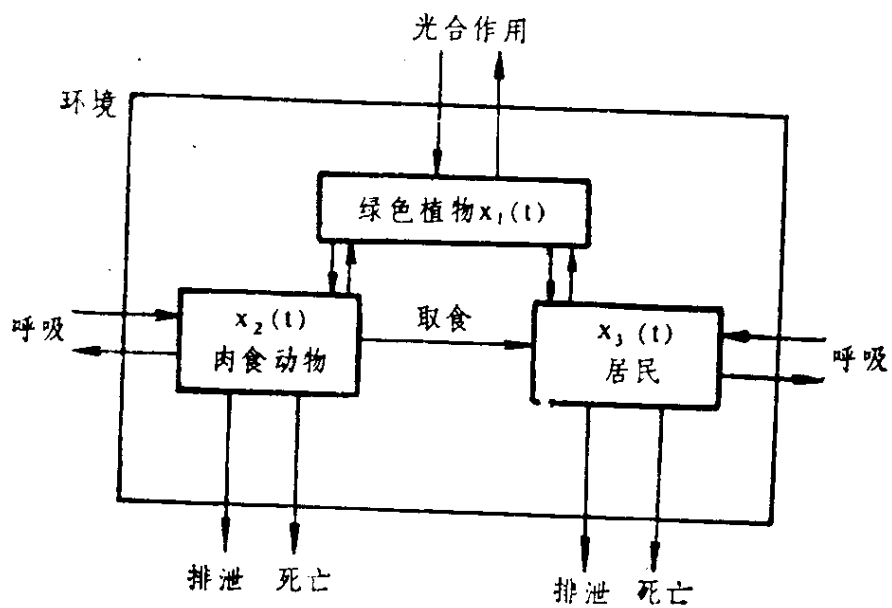


图12.4 牧场能流关系框图

明其输入项、输出项及其所处的态。这样，就能画出下列框图来刻划这一牧场中与能流有关的主要因素与关系：（见上页图12·4）

现用 x 表示态， u 表示输入， y 表示输出， m 表示环境， u_{ik} 表示能量从 i 流向 k ，则可画出各分室的能流图（图12·5）：

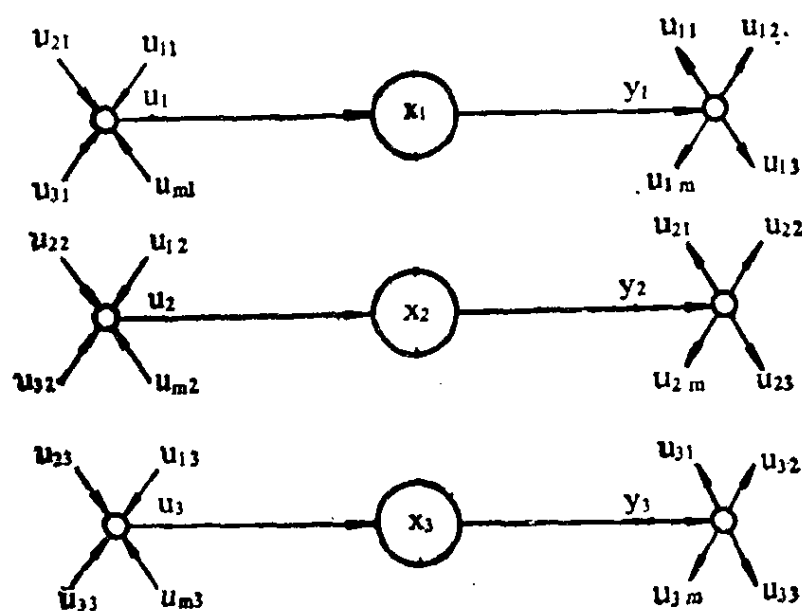


图12·5 牧场能流网络分析图

将各分室能流图综合起来，可得这一牧场的能流网络图，构成这一系统的逻辑模型（图12·6）：

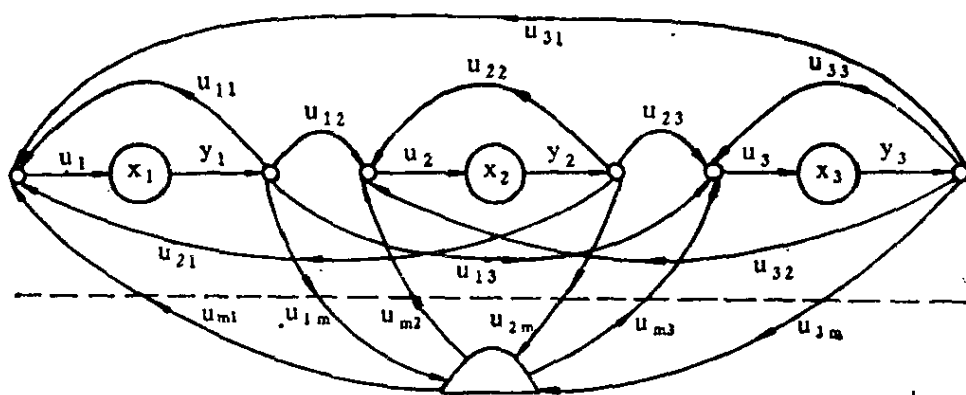


图12·6 牧场能流网络综合图

其中 u 、 y 都是能通率，其单位是能量密度/时间，因此可以列

出态的局部过渡动作方程

$$\frac{dx_i(t)}{dt} = u_1(t) + u_{2i}(t) + u_{3i}(t) + \cdots + \\ + u_{mi}(k) - y_i(k), (i = 1, 2, 3)$$

这样，我们就能导出这一系统的数学模型，这是决定性的模型。当然，实际上由于随机因素和模糊因素是不可避免的。根据不同情况，往往得到随机型的模型或模糊性的模型，因此，统计数学和模糊数学在系统分析中是必不可少的重要数学工具。

这个数学模型是一种抽象模型。它是否具有实用的价值，还要通过系统模拟来加以修正与确定，就是要运用计算机进行仿真，就是用初步建立的这类抽象的数学模型进行测试，以便比较不同方案，找出优化方案，作出决策。在决策后才能进行系统设计，进行建场施工，直到牧场建成与投入使用。这就是系统工程方法的一个实例。

第十三章 运筹学的主要分支与方法

第一节 运筹学方法的特点

运筹学采用科学步骤与数学方法来制定决策，是从第二次世界大战开始的，最初用在军事方面，后来，随着方法与工具的改进，运筹学建立了多种不同的模型和数据库，成为有广泛用途的决策方法。二次大战以后，运筹学在民用方面有了很大发展，如在自动管理存货、安排人力、公路交通、铁路交通或空中交通、工作程序、政府部门投资，尤其是经济研究、城市规划等方面都有了很大的用途。运筹学是一门已获得重大成效的学科，它是一门新兴的、有发展前途的综合性应用数学。

随着运筹学的研究进展和应用范围的扩大，按照科学技术发展的常规来看，它应该形成一种比较完整的理论体系了。但事实上，运筹学却有不同于其它学科的特点，作为一种应用数学，它的研究对象和范围相对来说是不确定的，并且对于有不同特点的对象，它一般也没有一种统一的方法来加以处理，而往往针对不同对象使用不同的方法。所用到的数学工具也是多种多样的。因此，对于运筹学来说，只能分别了解它的分支，至今还不能把它作为一个完整体系来了解。这个特点是由它的学科性质与研究对象的多样性所决定的。与此相联系的另一个特点是作为一种应用数学，它不仅只依靠数学家，而且必须依靠与解决一定问题有关的其他科学家与人员的共同参与，因此，它必须采用各学科综合研究的方法，以便尽可能周密地考虑到各方面有关的问题，从中

找出优化决策。这是运筹学方法的另一个特点，也是运筹学的各个分支在方法上的一个共同特点。这种方法说明，运筹学首先必须详细地阐明问题，全面地了解所追求的目标，深思熟虑地选择决策原则，而为此就要全面了解有关的各种因素，才能建立有关参量和条件的模型，探索出与各种假设相应的各种可能的方案，最终用于指导决策的选择。

这套方法表明，运筹学是一项集体工作，它是工程技术人员、数学理论家和实际操作人员集合在一起，发挥集体智慧的结果。

第二节 运筹学研究的主要问题与分支

运筹学是关于决策问题的学科。50年代后出现了运筹学的一些分支，如线性规划、博弈论，排队论，后来又发展出一些新的分支，如非线性规划，动态规划，图论方法，库存论，决策论等等。这些学科不仅是运筹学的分支，而且已经成为解决实际运筹工作的数学工具。这些学科把运筹学的数学方法具体化、实用化。我们将在下面简略地介绍一下运筹学的几个分支，具体地熟悉一下运筹学研究的问题与数学方法。

运筹学的分支虽然不少，其研究范围还在不断扩展，但大致可以归并为以下8类问题^①。为了有助于了解运筹学的内容，我们先说明它要解决的问题，然后举出简单的例子来说明如何用有关的数学方法加以解决。

分配问题

对于有限的资源、人员、设备、时间等因素构成的系统，为了最有效地实现某种目标或任务，如何统筹规划，以最优的方式

^① 参看《科学技术百科全书》第24卷，科学出版社版，第559页。

对有关因素加以安排或分配，使得耗费最小，效益最大而风险最小。与此相关的运筹学分支包括，线性规划、非线性规划与动态规划等，这些可统称为规划论。

举一个简单的例子：

某纺织厂用棉、毛、人造纤维作原料，生产甲、乙两种布。甲种布每米产值5元，乙种布每米产值7元，生产每种布一米所需原料如下表所示：

生产1米	棉	毛	人造纤维	单 位
甲种布	0.4	0.3	0.18	斤
乙种布	0.1	0.9	0.15	斤

问题是现有棉100斤，毛270斤，人造纤维660斤，该厂应如何安排两种布的生产，使产值最大？

用代数形式表达这一问题。设该厂要生产 x 米甲种布，生产 y 米乙种布。

生产 x 米甲种布所需原料：

棉： $0.4x$ （斤），毛： $0.3x$ （斤），人造纤维 $0.18x$ （斤）；

生产 y 米乙种布所需原料：

棉： $0.1y$ （斤），毛 $0.9y$ （斤），人造纤维 $0.15y$ （斤）。

生产两种布共需原料：

棉： $0.4x + 0.1y$ （斤），

毛： $0.3x + 0.9y$ （斤），

人造纤维： $0.18x + 0.15y$ （斤），

但是这些原料数量不能超过现有的棉、毛、人造纤维的数量，因此， x 和 y 要满足不等式：

$$0.4x + 0.1y \leq 100$$

$$0.3x + 0.9y \leq 270$$

$$0.18x + 0.15y \leq 660$$

两种布的生产数量 x 和 y 不可能是负数，因此， x 和 y 还要满足：

$$x \geq 0 \quad y \geq 0$$

x 和 y 要满足的这些不等式，统称为问题的约束条件。

生产 x 米甲种布和 y 米乙种布的总产值是 $(5x + 7y)$ 元，我们的目标就是使总产值最大。因此，

$$5x + 7y$$

这一代数式称为问题的目标函数。

综合起来，我们的问题是：在现有原料数量的限制下，使两种布的总产值达到最大，它的代数形式是：

求未知数 x 和 y ，它们满足

$$0.4x + 0.1y \leq 100$$

$$0.3x + 0.9y \leq 270$$

$$0.18x + 0.15y \leq 660$$

$$\text{其中 } x \geq 0, y \geq 0$$

使得 $5x + 7y = \max$ ($\max$ 为最大值)

满足约束条件的 x 、 y 称为可行解，其中使目标函数达到最大值的 x 、 y 称为最优解。从生产上说，一个可行解是一种安排方案，一个最优解，就是一个最优方案。

从这个例子我们可以看出，在求一些非负的变量时，如果它们满足某些线性方程式，或者线性不等式，并使一个线性函数达到最大值（或最小值），这样的问题我们就称之为线性规划。其一般的数学形式为①：

求一组 $X_1, X_2, \dots, X_n$ ，使之满足约束条件：

① 汪应洛主编：《系统工程导论》，机械工业出版社1982年版，第104页。

$$\left. \begin{array}{l} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n \leq b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2n}x_n \leq b_2 \\ \vdots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \cdots + a_{mn}x_n \leq b_m \end{array} \right\} \quad (1)$$

$$\text{与 } x_1 \geq 0, x_2 \geq 0 \cdots x_n \geq 0 \quad (2)$$

且使得目标函数

$$J = c_1x_1 + c_2x_2 + \cdots + c_nx_n \quad (3)$$

达到最大值（或最小值），其中 a_{ij} , b_{ij} , c_{ij} , ($i = 1, 2, \dots, m$, $j = 1, 2, \dots, n$) 是已知的。

满足约束条件式 (1) 及 (2) 的解称为可行解，一个可行解使目标函数 J 达到极值时，则称为最优解。

从数学上看，规划论的问题就是在一组约束条件下求目标函数的极值问题。当约束条件用线性的等式和不等式、目标函数用线性函数来表示时，称为线性规划。当约束条件或目标函数中出现非线性项时，则称为非线性规划。

对于线性规划，已经有了一些比较通用的，有效的数学解法与算法。对于非线性规划则至今还没有找到比较通用有效的解法与算法，只能对某些类型的问题求解，当有关函数满足某些特性时，才能有比较满意的解。

当规划问题与时间相关表现为一个过程，其前一时刻的行为将影响下一时刻的行为时，则称为动态规划，又称为多级决策理论。

以最短线路问题为例，从地点 A 要铺设一条管道到 B ，中间必须经过 5 个中间站，这样，就存在一个最短线路问题。

这是一个可以用动态规划求解的典型例子，用动态规划来解决这类问题，首先必须把实际问题改造成为一个动态规划模型，这时要用到下列概念：(1) 多段决定过程，(2) 状态，(3) 决定，(4) 状态转移，(5) 指标。

在上例中，我们可以把铺管工作看成一个六段过程，每铺完一段，我们都面临一个决策，下段终点选在哪里？如果历程是确定的、有限的，我们就叫作确定有限历程的多段决策过程。多段决策过程的发展可用各个阶段状态的演变去描述，称为状态变量。在每一段，当状态确定后，我们可选取几种不同的决策，使以后各段状态依不同方式演变，这称为决定变量。可供选择的路线很多，由这些决定变量就构成了可供选择的决策的集合，可供选择的决策集合称为允许决策集合。这样，就可以在允许决策集合中选取最优的决策，这就叫多段决策过程的最优化。要实现最优化，必须先提出一个能够用来衡量已经实现出来的过程好坏如何的数量指标。

上面就是用动态规划方法求多段决策过程中最优决策的基本思想。早在50年代，贝尔曼（Bellman）就研究了多段决策过程，提出“最优化原理”，可以用一个基本的递推公式来找出最短路径，就是从整个过程的终点出发，一步步往前推到起点，就可以推出最优解。人们在生产和科学实验等等的活动中，往往要按照预定的任务去实现某种事物的发展过程，这种过程是在人们的控制下进行的，在客观条件允许的范围之内采取适当的决策去控制过程的进程，使控制过程的结局达到最优。这就是动态规划所要解决的问题。

库存问题

商店为了满足顾客每天购物的需要，要贮存各类商品；军队为了将来作战的需要，要贮存各种作战装备；工厂为了连续不断地生产，要贮存一定的生产资料、原材料；为了防洪防旱，要建造水库贮存水。存贮问题是人类社会活动中的一个重要问题。但由于种种原因，存贮与实际需要总是存在一定的矛盾，商店商品贮存过多，会造成商品积压，贮存过少会造成脱销；作战物资贮备过少会造成军事行动上的被动……。因此，人们一直在注意如

何确定贮存量、贮存时间等问题，以求达到供求的一致。1915年国外就有人提出贮存问题中著名的“最佳批量公式”。二次大战期间提出了各式各样的贮存问题，随之找到了各种解决办法，到了50年代形成了库存论。库存论要研究在什么时候，以什么数量，以什么供应来源补充储备，使储备达到最优水平，以避免供应欠缺与库存过多的矛盾，并使耗费为最小。针对不同类型的问题有一些不同的解法，有的要用到规划论等工具。

排队问题

与此有关的排队论是研究系统拥挤和排队现象的一门学科，即是研究系统随机聚散的理论。排队论所研究的排队和拥挤现象，主要并不是人们日常所见的公共交通、排队购物等现象，而是距离人们日常生活较远的一些排队和拥挤现象，如飞机在机场上空盘旋，按照一定的次序等待着陆，通信卫星对同时到达的几路信息如何选择传递等等。

本世纪初期，丹麦哥本哈根的电话工程师爱尔朗（Erlang）探讨了这样的问题。在一个电话交换台前，当一个呼叫到达时，也就是一个人拿起话筒、拨了号码准备通话时，如果对方没有占线，则电话立即接通，否则，打电话的人就要等待。这就是一个排队问题。显然，如果占用的时间，以及顾客到达时刻能够严格控制的话，排队是可以避免的，但上述情况却是一个随机变量。爱尔朗在物理学家吉布斯的统计平衡概念的启发下，把统计概念借用过来，建立了呼叫生灭的模型，提出了爱尔朗公式，从而解决了这个问题。几十年来，电话系统设计，运行，就用爱尔朗公式来决定通话线路的数量与损失率。

由此可知，排队论所研究的是公用服务系统中的一种随机聚散现象，通过对每个随机现象的统计研究，找出平均的统计特性规律，用以合适地控制服务时间、设施的数量与布置等因素，使服务能力成为最优。

顺序问题

顺序问题也是公用服务系统所要加以考虑的。排队问题着重考虑的是服务设施要有合适的数量与布置，而顺序问题则考虑如何安排服务设施的次序，如何尽量缩短服务或处理问题的时间，以提高有关的效益。

更新问题

更新问题主要指设备或设施的更新问题。例如一台机器中的主要部件有的因为使用时间过长而磨损或损坏，使得这台机器需要进行维修甚至报废。那么，如果要使这台机器的使用率为最大，如何处理这个部件才能使机器正常运转？这至少可以有二种方案，一是等部件失效时才换，二是在不发生故障时只要达到其使用年限时就更换。问题是那一种方案为最优？所以更新问题至少要涉及到两个问题，一是该设备是否需要更换？二是何时更换为好？这是可以定量地来加以讨论的。前面提到过，在第二次世界大战中，英国空军关于飞机维修与使用率的研究就是这类问题。

路线问题

路线问题就是为达到某一目标而找出一条最优路径的问题。流通推销员问题就是一个典型的例子。设某厂有一流动推销员要到附近的几个城市去推销产品，这几个城市之间距离不同，问他应采取哪条路线才能在确定时间内走遍这几个城市而总路程为最短。显然，这可以用动态规划或某些搜索算法来求解，也与图论中所要讨论的最短路径有关。对这类问题目前还没有一般的方法或算法来求解，只能根据不同的问题找出不同的解法。

对抗问题

在一个系统中，尤其在大系统和复杂系统中，其中的一些因素可以具有对抗的性质。竞争就是一种对抗的现象。竞争的各方分别选择一定的策略，为了找出最优的对抗策略，50年代冯·诺意曼与摩根斯坦提出博弈论（又称对策论）。

一提到博弈，人们自然就会想到掷骰子与下棋，其实这两种博弈有着本质的不同。掷骰子纯粹靠运气，也就是依赖机遇，而下棋则取决于局中人所采取的策略。博弈论就是研究具有竞争意义的活动的，但依靠机遇的竞争活动并不是博弈论研究的对象，只有依靠策略取胜的活动才是博弈论的研究对象。

下面举出一个最简单的例子：两个小孩玩“剪刀、锤子、布”这种游戏，其胜负可用矩阵表示如下：

		乙方：		
		剪刀	锤子	布
甲方：	剪刀	0	-1	1
	锤子	1	0	-1
	布	-1	1	0

甲、乙两个小孩，各自有剪刀、锤子、布三种可供选择的策略。上表就是双方各取一种策略的胜负情况。“0”表示和局；“1”表示胜一分，“-1”表示输一分。这个游戏只有甲、乙两方参加，称为二人博弈，因为甲方之胜就是乙方之负，故称二人零和博弈。上列矩阵称为二人零和博弈矩阵，又称为支付矩阵。

在这类零和博弈中，一旦双方选定策略，得失便告定局。这里的一个根本问题是选取最优策略问题。要解决这个问题，我们这里引进两个概念，一是纯策略，例如剪刀、锤子、布就是三个纯策略；再一个是混合策略，如甲乙两个小孩共玩十次游戏，甲出三次剪刀，三次锤子，四次布，每一策略所使用的“频率”为0.3, 0.3, 0.4，这就是一个混合策略。这样一来，对方喜爱出什么，就在概率统计中泄露出来，当一个博弈重复进行多次时，局中人使用的混合策略仍存在一个最优值的问题。二人零和博弈与线性规划密切相关。

现在，博弈论有了很大的发展，应用也越来越广泛。例如飞机侦察潜艇。潜艇要选择在何处潜入水中，在何处浮出水面，这

是潜艇的策略，飞机的策略是应选择何处巡逻。当然最后的结局依赖于双方策略的选取。再有象谈判问题，经济问题，生产问题都有大量的多方博弈问题，这些复杂的博弈问题我们可以称为多人博弈（几人博弈）。另外还有许多不属于零和博弈范畴的，我们可以称为非零和博弈。这类博弈问题可用代数法、图解法、行列法、反复法和概率论等方法加以求解。

搜索问题

搜索问题是要研究如何合理地安排搜索手段（如人员、经费、途径、时间等），使得发现的概率为最大，并且使采样误差和观测误差为最小。

通过上述 8 个问题可以看出：不仅这些问题之间有着一定的联系，而且运筹学各个分支的数学方法也可根据需要而彼此交互使用。换句话说，一个问题有时要用到不同的数学方法，而同一数学方法又可以去解决多种不同类型的问题。这也是由运筹学方法的特点所决定的。

运筹学的分支除上述提到的以外，近年来还发展出一些新的分支，例如，决策问题。这是系统工程与运筹学的一个核心概念。新近发展起来的决策论，就是研究系统的状态、信息，及对由此而采取的策略与后果加以综合性研究，以便选择某种最优策略作出决策。再如可靠性理论等，近年来随着大系统的研究也日益受到重视。

运筹学与系统工程一样，都还在不断地取得进展，在不断克服其局限性中前进。

第十四章 一般系统论的形成 与基本概念

第一节 一般系统论的形成

在控制论、信息论与系统工程、运筹学的形成的同时，一般系统论也逐步形成和产生。

对系统的研究可以说是从古代就已经开始了。至于近代的系统研究，有人认为是由泰罗在1911年发表的《科学管理原理》一书中提出的，但一般公认，作为一般系统论的基本思想是本世纪20年代初由奥地利生物学家贝塔朗菲(Ludwig von Bertalanffy)提出的^①。当时他称之为“机体生物学”，有时也称“机体系统理论”，这是生物学中的有机论概念，强调生命现象是不能用机械论观点来揭示其规律的，而只能把它看作一个整体或系统来加以考察。他在1925—1926年期间提出有机体(organism)概念。在同一时期，著名生理学家贝尔纳(C. Bernard)也强调过有机主义的思想。生理学家坎农(Cannon)在1929—1932年期间提出的稳态概念，心理学家柯勒(Kohler)在1924年提出的“格式塔”(gestalt 亦称“完型”)概念，这些都可看作属于同一思潮。尤其是著名哲学家与数学家怀特海(A. N. Whitehead)对机械论进行了批评，认为应该用“一种机体论的理论”去代替它。他把这种理论称为“机体机械论”(organicmechanism)。他说：“在这一理论中，分子将遵照一般规律盲目运行，但由于各

^① 贝塔朗菲：《现代发展理论》，1934年英文本。

种分子所属总体的一般机体结构不同，而使其内在性质也各不相同”^①。这一思想与他的过程哲学也是有关的。

由上述可知，从20年代以来，从生物学、心理学到哲学领域兴起了一股有机主义的思潮。可以说，这股思潮主要是发源于理论生物学领域，同时也在哲学上得到反映。在理论生物学中称为生物机体论。这种理论观点与方法反映在哲学上往往称为有机主义。到了40至50年代，这一思潮更受到其他领域里学者们的赞许。例如，生理学家与精神病学家米勒（J. Miller）、经济学家保尔丁（K. Boulding）、数学家拉波波特（A. Rapoport）、著名物理学家费米（E. Fermi）等人，还有当时在芝加哥大学的一批学者，他们或是个别地，或是以聚会方式从事于系统研究。1937年，贝塔朗菲首次明确提出了一般系统论的原理。到1945年他发表了论文《关于一般系统论》术语。1954年成立了“一般系统论学会”，后来改为“一般系统研究会”。到60年代，一般系统论的思想与方法已经产生了较大的影响，这与系统工程、运筹学、大系统理论等学科的发展也是密切相关的。1968年，贝塔朗菲发表了专著：《一般系统理论——基础、发展与应用》，研究者多以这本书作为一般系统论的代表性著作。此后陆续出现了大量的论著，形成一股重要的思潮，涉及到很多不同的分支学科，日益发挥出重大而深远的影响。

第二节 一般系统论的基本概念

一般系统论虽导源于理论生物学中的生物机体论，但它本身与哲学、方法论密切相关，与哲学上的有机主义属于同一思潮。就学科性质来说，一般系统论并不是理论生物学体系中的一个分

① 怀特海：《科学与近代世界》，商务印书馆版，第76页。

支，而主要是与其相关的一种基本理论、基本方法的体系，但它本身也不等于哲学。可以说，它是一种介乎具体科学（生物学）与哲学之间、具有横断科学性质的基本理论，具有一般的科学方法论特点。所以，贝塔朗菲认为“在不同领域中表现出结构上的相似性或同构性”^①，可以看作一般系统论形成的一种重要依据。换句话说，在各种不同的系统中，会存在某种相似性或同构性，这就成为关于系统的一般理论与方法的客观依据。因此，贝塔朗菲认为一般系统论的任务是要找到不同系统、不同学科之间的共同语言和术语，而建立这种共同语言的理论是可能的。在这个意义上，我们可以把一般系统论理解为关于任意系统研究的一种一般的理论与方法论。

从这一观点出发，贝塔朗菲是有科学统一思想。他在《一般系统论》的附录中专门讨论了“科学的统一”（“Unity of Science”）问题。他所说的共同语言是建立在相似性或同构性基础上的，而不是逻辑实证主义的那种离开客观基础的在所谓语言分析上的“科学统一”。同时，他的这种思想，在方法论上是建立在对于不同系统的某种相似性或同构性之间的类比的基础上的。因此，乌耶莫夫把这称为“类比型”的一般系统论。在乌耶莫夫看来，类比不限于对同构、同态这类相似性的类比，在有些情况下，对于有些不同系统间的数据与资料，需要经过专门的逻辑分析，甚至要借助于电子计算机才能将其中的某些内在联系找出来，从而确定其参量及联系，找出更为内在的规律。他称此为参量型一般系统论^②。所以，贝塔朗菲的理论与方法只是关于系统

① L.von Bertalanffy,《General System Theory, Foundations, Development, Application》, 1968, P.33。

② 参看A.N.乌耶莫夫：《类比型与参量型普通系统论》，载《世界科学译刊》，1980年第12期。

的一般研究中的一种，其理由就在于此。这也说明，当前关于一般系统论的研究还在不断进展之中，已出现一些不同的学派与分支。

现在，我们仅就与贝塔朗菲一般系统论有关的一些基本概念与观点来简略地加以概述。

系统的整体性

贝塔朗菲把系统看作最重要的概念。前已指出，他曾经给系统下过这样的定义“系统的定义可以确定为处于一定的相互关系中并与环境发生关系的各组成部分（要素）的总体”^①。贝塔朗菲认为，首先，“系统”概念有其客观性，它广泛地存在于自然、社会各个领域之中，并且越来越被人们所深刻认识。与系统概念为核心的“系统思想从工业企业、军备，一直到纯科学的深奥论题等广阔领域中，正在起着支配作用”^②。其次，系统思想之所以能够发挥这样大的作用，关键在于它本身的性质。一般系统论中的“系统”概念，具有一些显著的特征：首先是系统的整体性。

所谓整体性，贝塔朗菲是针对机械论的系统观而提出的。无论哪种观点，都不否认系统是由其组成部分（因素或子系统）构成的。问题在于对这些组成部分之间的关系可以有不同的理解。如果认为系统的性质或特点是其组成部分的性质或特点的简单总和（是一种代数的总和，或者说，具有可加性），则这是一种机械论的系统观。亚里斯多德曾指出：整体大于各孤立部分之和，这是一般系统论关于系统的一个基本观点。贝塔朗菲所说的整体性，就是在这个含义上来使用的。

① 贝塔朗菲：《普通系统论的历史和现状》，载《国外社会科学》，1978年第2期，第315页。

② L.von Bertalanffy, 《General System Theory》1968, P.3.

贝塔朗菲是从理论生物学的角度提出这个问题的。长期以来，在生物学对于生命现象的解释中，存在着机械论与活力论两种对立的观点。从牛顿以来，机械论力学在生物学中也占据支配的地位。但是，生物学中有很多现象是不能用机械论来解释的，因此活力论也有重大的影响。

一个典型的例子就是胚胎学家杜里舒 (H. Driesch) 的实验及其观点的转变过程。他在1894年写的胚胎发生学著作中坚持了机械论观点。只隔5年，他的另一部著作则明显地倾向于活力论观点了。他写道：“当我漫步于造船码头时，我对于正在发生的事情仍然是蒙昧无知的。我能看到每个部件是如何制造出来的，但不知道如何将它们装配成一个‘整体’”。^①显然，这个“整体”不是各个部件的简单总和。贝塔朗菲所说的整体性，正是这个含义。当然，他不是活力论的立场上来使用的。

杜里舒的这种观点是以他的一个著名实验，即关于海胆的实验为根据的。如下图所示：

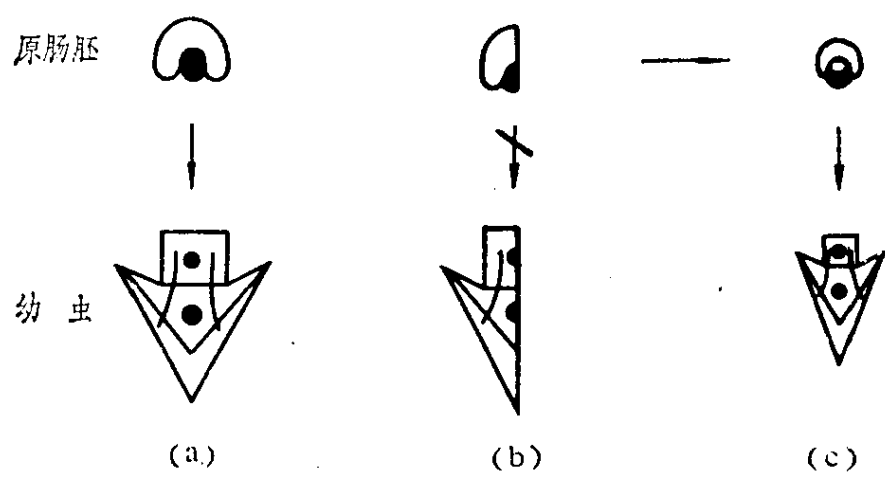


图14.1 杜里舒的海胆实验

在图 (a) 中表示海胆受精卵经过胚胎发育的原肠胚阶段 正常地发育为幼虫。杜里舒在原肠胚的阶段，将之切成两半，本来

^① 转引自〔英〕P.卡洛：《生物机器》，科学出版社版，第10页。

以为它只能如(b)图所示形成半个幼虫,其实不然,那切得的半个原肠胚竟形成一个较小而完整的胚胎,如(c)所示,最后发育成完整而较小的幼虫。

一些生物学家曾用活力论或目的论来解释这个试验。就实验本身来说,它确实表明了系统不是部分的简单总和这一整体性的特点。贝塔朗菲用异因同果、等效性来描述这种现象,他认为等效性是活力论的一种依据。

贝塔朗菲在他的专著中,列举了大量的事实和例证来论证系统的这种“整体”性。从自然、社会到人类思维的种种系统都是如此。所以他着重指出:“为了理解一个整体或系统不仅需要了解其各个部分,而且同样还需要了解它们之间的关系(譬如:细胞中酶的相互作用、个性中有意识与无意识过程的各种各样的相互影响,社会制度的结构和运动,等等),甚至在物理学中也出现这类问题。例如:许多一般的‘力’的相互作用。因此,首先需要按其特征实事求是地研究我们所观察的宇宙中的大量现实的系统;其次是找出各个‘系统’的一般方面,一致性和同态性,这是一般系统论的范围。”^①他主张从事物的关系中、相互作用中发现系统的规律性,这就是整体性观点的具体表述。贝塔朗菲将这些论据从理论上加以概括,用亚里斯多德的著名悖论命题:“整体大于各孤立部分之和”表示出来,有人称之为贝塔朗菲系统定律。

从系统的整体性这个最基本的特征出发,贝塔朗菲甚至以此给出了一般系统论的一种定义,他说:“一般系统论是关于‘整体’的一般科学”^②。而在一般系统论中,整体性是有确切含义

① 贝塔朗菲:《普通系统论的历史和现状》,载《国外社会科学》,1978年第2期。

② L.von.Bertalanffy:《General System Theory》,P37。

的、起着核心作用的概念。与此相关，也就有了整体性的原则。

系统的有机关联性

系统的整体性作为一般系统论的核心，是由系统的有机性，即由系统内部诸因素之间以及系统与环境之间的有机联系来保证的。在一般系统论中，要着重研究系统的诸因素之间的相互联系、相互作用。这种重要的性质常用“有机关联性”这个概念来表述。这个概念表示了这样一个基本原则，就是指任何具有整体性的系统，它内部的诸因素之间的联系都是有机的。诸部分之间相互关联、相互作用，共同地构成系统的整体。各个因素，在系统中不仅是各自独立的子系统，而且是组成母系统的有机成员。同时，系统与环境也处于有机联系之中。

有机关联性使一般系统论的整体性进一步具体化、深刻化。它把“整体性”概念同“总和”概念(wholeness and sum)科学地区别开来。贝塔朗菲认为：“我们可以把总和(summativity)定义为，最初是分离的东西逐渐地汇集，换句话说，就是筑造起来的复合体。反之，我们可以将这个复合体分解成相分离的成分。”^①但是，在引进了“有机关联性”的内容后，系统便处于一种有机的关联中，就是说这个系统不仅其增长不是机械的汇集，而且诸部分之间的联系也是不可分割的。譬如：生物体的异化生长，物理学中原子的衰变，都是按照自己固有的规律发展变化的。有机关联性原则丰富和补充了整体性原则的内容。

有机关联性原则，概括起来包括两方面的内容，一方面是系统内部诸因素的有机关联；另一方面是系统同外部环境的有机关联。

系统与其外部环境之间的有机关联，使得系统具有开放的性质，或简称为开系统。一般系统论所研究或处理的系统基本都是

^① L.von Bertalanffy,《General System Theory》,1968,P.66.

开系统。一般系统论的系统概念的另一特点即是具有开系统的性质。作为一个系统,当被定义为开系统时是说它同外界有物质的、能量的、信息的交换,有相应的输出和输入以及量的增加或减少。这种性质对于我们理解一般系统论的系统概念是很关键的。在热力学第二定律那里,系统是被当作一个孤立的系统,即这个系统同外界没有任何的物质的、能量的、信息的交换,最后导致了哲学上的“世界热寂说”。贝塔朗菲所说的系统是指开系统,“开系统的理论是一般系统论的一部分”^①。它不仅可以用到生物界,而且可以应用在物理、化学、社会以及经济领域。

系统内部诸因素之间必须具有有机的关联,才能与系统的“开”性质一道,保证系统的整体性。贝塔朗菲不仅定性地说明这些观点,而且企图定量地加以论述,以便使一般系统论成为一种逻辑的与数学的科学。他说过:“一般系统论可以加以严格地展开使之具有公理的性质。这就是说,从‘系统’的概念和一组合适的公理命题就能推演出系统的特性和原理。”^②应该承认,这个意图是好的,他也曾作了极大的努力,但没有取得成功。总的来说,一般系统论在他那里仍处于定性的阶段。尽管如此,本书仍用下例来说明贝塔朗菲是如何用一组联立微分方程来描述系统的有机关联性与整体性之间的关系的。

$$\begin{aligned}\frac{dQ_1}{dt} &= f_1(Q_1, Q_2, \dots, Q_n), \\ \frac{dQ_2}{dt} &= f_2(Q_1, Q_2, \dots, Q_n), \\ &\vdots \\ \frac{dQ_n}{dt} &= f_n(Q_1, Q_2, \dots, Q_n),\end{aligned}\tag{14.1}$$

① L.von Bertalanffy, 《General System Theory》,1968,P.66.

② L.von Bertalanffy, 《General System Theory》,P.55.

在上式中, Q_i 表示系统中某元素 $P_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 的某种量。上列的联立微分方程组表明任意的一个 Q_i 量的变化都要受到所有的 Q (从 Q_1 到 Q_n) 的制约, 因而是所有 Q (从 Q_1 到 Q_n) 的函数; 反之, 任一 Q 的变化也会影响到所有其它的量以至整个方程组的变化。由此可见系统是一个由相互关联的因素构成的整体。在这系统中的元素 P_i 总是处于一定的关系 R 之中, 但同一 P_i 在不同的关系 R 、 R' 中就会表现出不同的特点和行为。这种描述说明了系统的有机关联性及其与整体性的关系。贝塔朗菲用上述基本方程组描述了一般系统论中的一些概念与原则, 在此从略, 感兴趣的读者可参阅其专著。

贝塔朗菲在指出系统内部诸因素的有机关联性之后, 进而论述了有关的基本概念, 主要是结构概念。

系统作为一种有机关联的整体, 这种有机关联一般表现为系统的一定结构。贝塔朗菲最初并没有明确使用过“结构”这个概念。但是他具有丰富的“结构”思想。在他那里, 常常用“等级秩序” (hierarchical order)、 “秩序”、 “组织”、 “层次”等概念来表示这种思想, 后来他逐步发展了这个思想。在他看来, 一个系统既是一个自己独立的整体, 同时又是高一层次的子系统。他把这些归结为是等级秩序的一种具体表现, 也是结构和层次的一种表现。

贝塔朗菲有时将结构称为“部分的秩序”, 也就是指系统各要素在空间上的分布, 主要强调的是各要素构成系统的方式。而“功能”的概念虽与结构相关, 但他强调的是“过程的秩序”, 贝塔朗菲认为: 归根结底, 结构(部分的秩序)和功能(过程的秩序)完全是一回事, 在物理世界中物质分解为能量的活动, 而在生物世界里结构就是过程流的表现。这样结构就反映了系统在空间和时间上的秩序, 同时, 也是有序性的一种表现。

系统的动态性

系统的有机关联性不是静态的，而是与时间有关的（在上述联立微分方程组中是有 $\frac{d}{dt}$ 项的），是动态的，有的论著由此而提出动态性原则。

贝塔朗菲在一般系统论中较多地论述了系统动态性，例如：生长、发育、体内平衡等概念。动态一般理解为事物的运动状态，机械论者认为就是机械的运动；在一般系统论中，贝塔朗菲认为任何系统都随时间不断地变化。并且，他从生物学的角度进行讨论，认为动态是系统保持静态的前提，例如：生命有机体保持体内平衡的基础之一是新陈代谢的存在。

普通系统论的动态性，同有机关联性密切联系，有机关联性强调的是各要素之间空间的分布，而动态性原则则强调的是时间上的变化。一方面，系统内部的结构，其分布位置不是固定不变的，而是随时间变化的。另一方面，系统的开放性质，有机关联性强调的是系统同外界物质、能量、信息的关联、交换。而动态性则强调这种物质、能量、信息的存在状态，它们在系统中可以表现为相对的稳态，但稳态绝不是静态，稳态是含有动态的一种运动状态。例如，“渐进分异”、“发育”这些概念都有“运动”的含义，它们都是指的一种物质流、能量流、信息流，强调的是连续不断性。任何系统都是开放系统，开放系统每时每刻都处于物质、能量、信息的交换、流动之中。开放系统是系统处于动态的条件，动态又是开放系统的必然表现。

与系统的动态性相联系，贝塔朗菲提出了一些有关的概念。这里只介绍一下渐进分异（Progressive Segregation）概念。

贝塔朗菲指出，在物理系统中的整体，如原子、分子及晶体，是由原来存在的那些元素联合而成的。而生物系统中的整体则不同，往往是通过原来存在的整体的分化而建立起来的，如经过胚胎逐渐发育成长为动植物有机体，就是一个明显的例子。所以他将“系统从整体状态演变为各个元素的独立状态。系统的原始统

一状态逐渐分裂为彼此独立的因果链”^①的这种现象称为渐进分异。这是系统的动态性的一种表现。用(14.2)式来表示,就是Q的系数 a_{ij} 不是常数,而是随时间 t 的增大而减小,最简单的例子是:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} a_{ij} = 0 \quad (14.2)$$

所以,渐进分异有时又称为“发育”(growth)。它反映了一个系统具有发展的趋势,譬如:细菌的个体成长就是一种最简单的情况,每一个个体都分为两个,两个又分裂为四个,等等。物理学中的电子衰变、化学中的分子反应也可以认为是这种情况。贝塔朗菲在这里是借用了生物学中的现象,但所描述的现象则不限于生物系统。他用这类概念来表示系统是一种动态的过程,是处于不断的变化和发展过程中的,这是由开系统的性质和系统的有机关联性所决定的。

当然,贝塔朗菲在这里借用生物学的现象是要着重指出系统的动态性必然具有方向性。他以生物系统为例,说明系统的渐进分异会导致系统结构的分化,出现分工日益变细的专门化,使调节作用相应加强的现象。同时,这也使系统向复杂化发展。所以,系统的动态性在一般系统论中不是消极地反映系统是个过程,而且要显示出系统过程发展的方向性。这也提出了系统的有序性问题。

系统的有序性

系统的有机关联性所表现出的结构、层次以及系统的动态性所表现的渐进分异的方向性,都使系统具有有序性的特点,由此而提出有序性的原则。

有序与无序是当前系统科学研究中的一对重要概念。在现代的理论物理学、理论生物学中有很重要的意义。贝塔朗菲在一般

^① L.von.Bertalanffy,《General System Theory》,1968,P.68.

系统论中，曾在一定程度上论述了这些概念。系统从无序到有序标志着系统的组织性或组织度的增长，而系统的组织性既与系统内部因素的有机关联性有关，又与其动态过程有关。

系统的预决性 (finality, 或目的性)

在一般系统论中，不仅要指出系统的有序性，而且要强调这种有序性是具有预决性的。“finality”这个词有人译为终极性或目的性，从贝塔朗菲的思想来看，似以译为预决性为好，就是说，一般系统论认为系统的有序性不是为有序而有序的，而是按一定方向而有序，不仅如此，这种方向是由一定的预决性或目的性所支配的。这个思想是有深刻意义的。

传统的科学和哲学常常给予“目的性”以神秘的解释。在一般系统论中，贝塔朗菲给出了一种解释，赋予它以科学的含义。他指出：一个系统的发展方向，取决于该系统的“预决性”。什么叫预决性呢？他认为，一个系统不仅要由实际条件来决定，而且要受所达到的最后状态所制约。因此，预决性就被认为是要取决于未来的^①。这就是说，一个系统的发展方向，不但取决于实际的状态（必然性），而且还取决于对未来的预测（偶然性）这两者的统一便是所谓预决性。贝塔朗菲认为这种性质在任何系统，无论是机械系统还是其他类型的系统中，都是客观存在的。

贝塔朗菲认为这种情况可以用数学方式加以描述，他说，在我们研究系统趋向一种稳定状态时，它的变化不仅可以从实际状态方面来表示，而且可以从到稳定态的距离方面来表示，如果 Q_i^* 是稳态时的量值，那么可引入新的变量：

$$Q_i = Q_i^* - Q_i'$$

使得

^① L.von Bertalanffy:《General System Theory》,1968,P.76.

$$\frac{dQ_1}{dx} = f[(Q_1^* - Q_1'), (Q_2^* - Q_2'), \dots (Q_n^* - Q_n')] \quad (14.3)$$

这个数学过程可以表述如下：在系统趋近稳态这种情况中，变化的发生不仅可以从实际状态方面表示，而且可以从到平衡态的距离来表示，系统似乎以一个只能在未来达到的平衡态为目标，否则，偶然发生的事件可以表示为取决于一个未来的最后状态。

贝塔朗菲认为，以广义上讲，一般系统论中的预决性 (finality) 就是目的性 (purposiveness)，但不是目的论 (teleology)。从狭义上讲，目的性可以仅限于系统要达到的那种“最后状态”的预测和方向性。这样一来，我们就为被经典科学排斥在外的目的性、方向性、有序性等概念找到了一个合法的位置。贝塔朗菲说过，在现代科学中，将这些概念排斥在外简直是不可想象的。

预决性或目的性概念在贝塔朗菲的一般系统论中占有重要地位，是一般系统论提出的基本概念之一。

综上所述，一般系统论涉及的问题是很多的。就基本概念来说，它着重强调系统的整体性，可以说整体性是一般系统论的核心。与系统的整体性相关的是系统的有机关联性、动态性、有序性与预决性。通过这些有关的基本概念、特点与原则，有助于我们了解一般系统论的基本思想与方法。

第十五章 系统科学与系统方法

第一节 系统科学的涵义

自从50年代前后,系统工程、运筹学、一般系统论、电子计算机与控制论、信息论等新兴学科出现以来,由于社会和生产发展的需要,这些学科发展很快,并相互渗透、相互结合,日益显示出重大的意义与作用。到60——70年代,系统工程与工程控制论中的大系统理论相互渗透,运用于从技术系统到社会系统的广泛领域,对社会生产与社会管理发挥了日益明显的实效作用,并将具有深远的影响,于是国内外学者一般公认系统科学正在形成。在方法论上也相应地出现了一种新颖的系统方法。但是,正如本书上一篇中所指出的,对于什么是信息科学与信息方法是有不同的理解的,同样对什么是系统科学与系统方法也是有不同的理解,术语的用法也是相当含混的。

系统工程是各类不同系统工程的一个总称。就各种不同的系统工程来说,它们只是工程技术。作为这些不同系统工程的总称或整体性研究的系统工程才可以称为技术科学。这是按一般的科学分类原则而区分的不同层次。但是,在60至70年代期间,有一些学者已经将系统工程称为系统科学,美国的《系统工程》杂志也改标为《系统科学》杂志。这些变化表明,即使是作为技术或技术科学的系统工程,也在与有关的基础理论发生联系。因此,必然要出现系统科学这个术语及其相应的学科,但是它的内容与范围至今还是不确定、不明确的。

随着系统工程等学科的重大作用日益明显，有关系统的基本理论的研究就日益显得重要，一般系统论在这种情况下也就日渐显示出它的重要意义。贝塔朗菲曾把一般系统论分成狭义的和广义的。他说：“狭义一般系统论，即从系统成分之间的相互联系的复杂性、整体机制的特点，例如，相互联结、总和、机制、集中、竞争、目的等一般方面对系统概念进行描述，并对其诸因素进行具体分析。”“广义的一般系统论，它属于基础科学，并与其应用科学有密切的联系；有时也可归为一般系统科学，它的发展同现代自动化密切联系在一起，但它同诸如系统工程、操作方法等是有严格区别的。”^① 贝塔朗菲在这里仅仅是对一般系统论本身进行分类。实际上，他的这种区分不过是把狭义的看作是理论性的一般系统论，广义的看作是应用性的一般系统论。后者与控制论、信息论、系统工程、运筹学等联系在一起，与我们现在说的系统科学相近似。甚至他倾向于将控制论、信息论、系统工程与运筹学等，看作是应用了一般系统论的产物。这种看法，最多只能理解为那些学科有意或无意地要用到系统的概念或方法，而不能认为就是历史的事实。事实上，如本书以上各章所述，它们是分别独立地形成和产生的。只是作为一种思潮，才要看到其间的内在联系。此外，贝塔朗菲还将一般系统论区分为“系统”的科学、数学系统论、系统技术、系统哲学三个方面^②。比较贝塔朗菲的上述两种分法，可见他并没赋予“系统科学”这个术语以确切的含义。

在国内，虽然近年来对系统科学的研究有较大的进展，但对其理解也是很不一致的。例如有人明确认为：“系统科学包括五

① Bertalanffy, 《General System Theory》, 1968, p.91.

② 参看贝塔朗菲：《普通系统论的历史和现状》，载《国外社会科学》，1978年第2期。

个方面的内容，有系统概念、一般系统理论、系统理论分论、系统方法论（系统工程和系统分析包括在其内）和系统方法的应用。”^①系统概念就是有关系统的一般思想与理论，一般系统理论是指用数学的形式描述和确定系统的结构与行为的纯数学理论。系统理论分论是指为了解决各种特点的系统结构与行为的一些专门学科，如图论、博弈论、排队论、运筹学等等。系统方法论是指为了对系统对象进行分析、计划、设计和运用时所采用的具体应用理论及技术的方法步骤，主要指系统工程和系统分析，系统方法的应用是指将系统科学思想和方法用到各个具体领域中去。如下图（图15.1）所示。

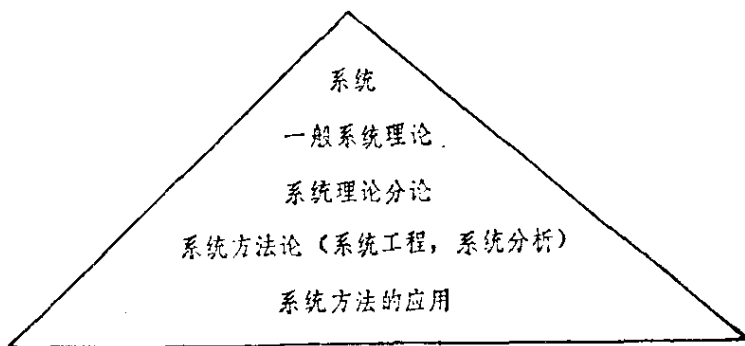


图15.1 对系统科学的一种理解图

从上图可以看出，对系统科学的这样一种理解是把关于系统的观点、数学理论和系统工程、运筹学、控制论、信息论、计算机科学技术及这些学科的广泛运用通通包括在系统科学之内。也可以说是把贝塔朗菲的上述两种分法都包括在内。这样，系统科学这个术语就成为这样一类科学技术，甚至包括哲学、社会科学、方法论在内的一个总称。

同时还要注意到这其中也包括了系统方法论。系统科学是否应该包括系统方法论在内？二者是何关系？现在，一般都认为系

^① 《系统工程普及讲座汇编》上册，中国科协普及部编，第8页。

统科学具有方法论性质。但对什么是系统方法，什么是系统方法论，仍然很不清楚。例如，系统方法指的是系统工程方法、系统分析方法、运筹学方法，还是指一般系统论所派生的方法，是不是在这些具体科学技术的具体方法之上还存在着一般性的方法，是否只有这种方法才叫作系统方法论，对这一系列问题，国内外至今仍众论不一。这种现象对于一些新兴的学科来说是正常的，它们都有待于深刻地加以探讨。

钱学森除了在国内倡导系统工程的研究与应用外，还十分重视系统科学的研究。1979年他发表了《大力发展系统工程，尽早建立系统科学的体系》专文。此后多次发表了关于系统科学及其体系的一些观点，一直到1981年他发表《再谈系统科学的体系》为止，逐步形成了他的系统科学体系观。钱学森把系统科学看成与自然科学、数学科学和社会科学具有同等地位的一门学科，认为这门学科还应包括系统学，即把运筹学和控制论、信息论结合起来的理论。钱学森最近对系统科学体系又作了新的归纳。他把科学体系分成四个台阶：哲学、基础科学、技术科学、工程技术。系统科学体系包括这四个台阶的内容，系统观是关于系统的一般哲学、方法论观点。运筹学、控制论（巨系统理论）、信息论是系统科学的技术科学。各门系统工程、通讯技术、自动化技术则是系统科学的工程技术。如下页图所示。

通过上述几种观点可以看出，从60至70年代以来，系统科学正在形成，但对系统科学的理解是不同的。与此相关，系统科学具有方法论的性质与作用也是事实，但对于什么是系统方法也是有不同理解的。这都有待于进一步加以探讨。

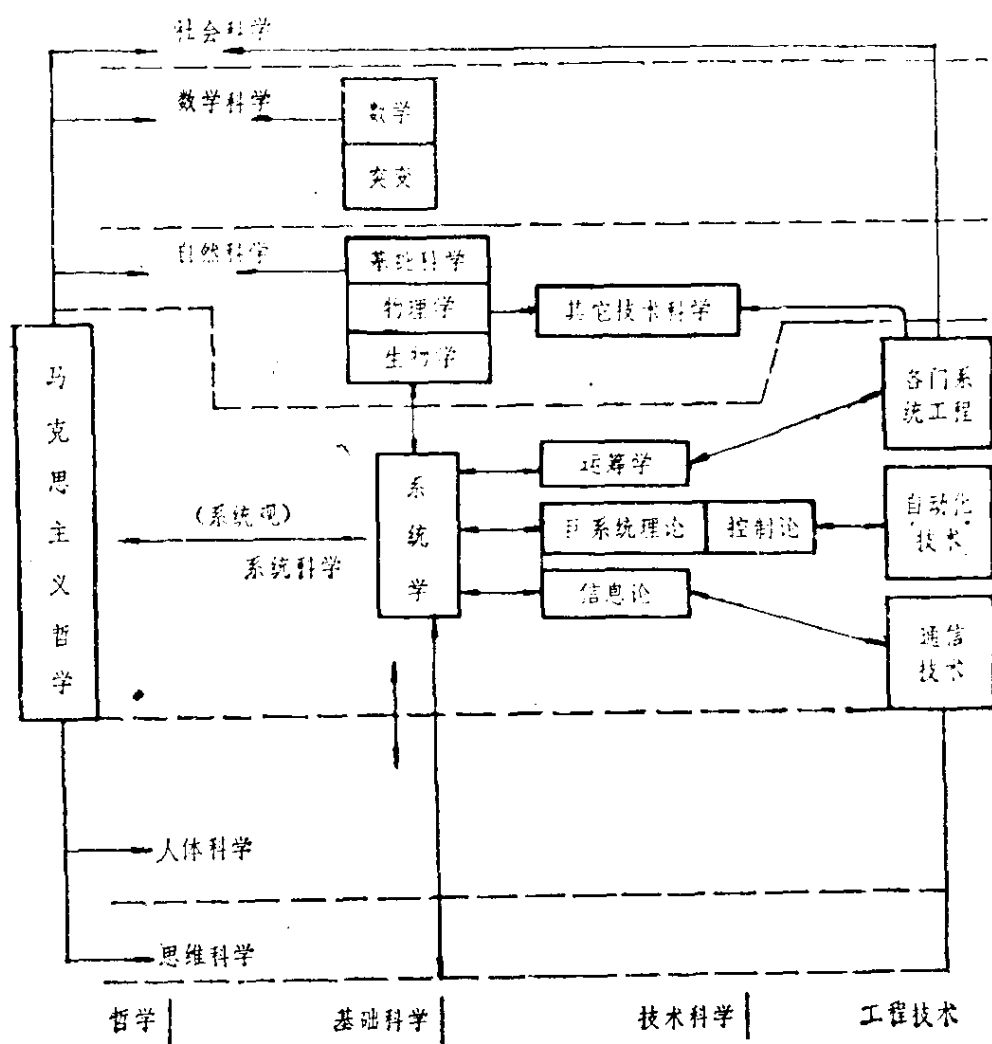


图15·2 钱学森的系统科学体系图

第二节 热力学、信息熵与生命系统的进化

贝塔朗菲企图建立一种包括数学的、逻辑的理论的一般系统论体系。但事实上，正如一些学者所指出的，他的理论并没有解决定量描述与处理的问题。近年来理论生物学与理论物理学等学科的研究有了一些新的突破与进展，对于系统的定量研究作出了

贡献，这使得系统科学进入了定量的研究阶段。钱学森认为与系统学有关的不仅有运筹学、控制论和信息论这些技术科学，而且与一般系统论、理论生物学、普里高津（I. Prigogine）的系统远离热力学平衡态的耗散结构理论、哈肯（H. Haken）的协同学（synergetics，也有译为协和学的）、弗勒利希（H. Fröhlich）微波激励生物细胞分离理论、爱肯（M. Eigen）关于生命自组织巨系统的超循环（hypercycle）理论以及托姆（R. Thom）的突变论等学科有关。他认为只有将这几方面结合起来才能建立起系统科学、系统学的基础理论。

钱学森在这里所提到的这些分支都是理论生物学、理论物理学和应用数学等学科自身发展的产物。它们本身并不是系统科学的分支，但在以后的发展中却充分显示出了与系统科学的密切联系。介绍这些学科及分布的内容本身并不属于本书的范围，但为了说明其与系统科学的关系，又不能不简略地介绍其内容大意，尤其不能不弄清它的来龙去脉。

从近代的科学技术史与哲学史来看，自从确立了热力学第二定律以来，关于物理系统与生命系统的关系问题，即这二者之间除了差别以外是否还存在着统一性的问题，一直是科学家与哲学家所共同关心的一个重大理论问题。控制论在实质上是要探索这种统一性，并试图用功能模拟的方法来处理这个问题。同时，与控制论密切相关的信息论所提出的信息量作为负熵与热力学熵的内在联系也给人们提供了一种深刻的启示，使得一些不同学科的学者为探索这一问题作出了很大努力。尤其是耗散结构、协同学、超循环理论等，不仅定性地，而且定量地探索了由物理系统向生命系统进化的一些内在机制，揭示了自组织系统的一些客观规律性，并从科学上提供了世界的一幅系统的轮廓，这对哲学与方法论具有重大意义。

为了说明上述的论点，本节将从科学技术史的角度简略地论

述从热力学第二定律到控制论、信息论中关于物理系统与生命系统相互关系的研究进展。同时，也只有当我们将有关的一些分支与论点加以论述之后，才有可能加以综合起来进行论述。

问题的提出

维纳在《控制论》的第一章中专门讲述了柏格森时间问题。柏格森认为物理学的时间和进化论与生物学的时间不同，前者是可逆的，其中没有什么新事物出现，后者是不可逆的，其中总是发生着新奇的事物。也是在这一年，在《通讯的数学理论》中，申农提出了信息量的概念及公式。这一公式与物理学中熵的公式有惊人的相似，只差一个负号，于是信息论就从物理学中把熵这一概念借用过来，并根据那一个负号，称之为负熵。这种形式上的相似和区别再一次提出了物理现象和生命现象之间的本质联系和区别的问题。

1949年，布里渊发表了一篇重要论文：《生命、热力学和控制论》。在这篇论文中，他回顾、总结了关于热力学与生命问题讨论的历史，并提出了自己的一些观点。

关于热力学第二定律

1850年，克劳胥斯首次对热力学第二定律作出这样的一种表述，即不可能把热量从低温物体传到高温物体而不引起其他变化，即热传导不可逆。1865年，克劳胥斯在讨论热循环时又用熵的形式表达了这一定律。熵从状态A至状态B的变化通常定义为：

$$S_B - S_A = \int_A^B \frac{dQ}{T}。其中dQ是系统在温度T时所吸收的热，$$

从积分路径看是可逆的。用熵的术语来表达第二定律就是宇宙的熵是不会减少的，即 $\Delta S \leq 0$ 。

用日常语言来讲，热力学第二定律指出这样一条重要的规律：对一孤立系统来说，一切不可逆过程都会使熵增加，最终趋于平衡态，平衡态的特征是熵最大。在平衡状态下，体系混乱度

最大，无序性最高，组织程度最差，信息量最少，而且一经进入平衡态，便维持这个平衡态，不能飞跃为另一种新质的不同状态，因此，有人说，热力学第二定律是对宇宙死亡的宣判。

当时，没有什么实验可以反驳第二定律，人们象相信其它物理学定律一样相信它，但是，人们已认识到这一定律中蕴含着许多重要的理论问题。其中特别重要的是时间的不可逆性问题。时间不可逆的观点同人类的经验是一致的，因为生命的出生、生长、衰老和死亡都充分显示了时间的不可逆性。但大多数物理定律都是可逆的，它们当中包含有时间，但与时间前边的符号无关，当 t 变为 $-t$ 时这些定律保持不变。只有当人们考虑与热力学第二定律有关的现象，如摩擦、扩散、能量转移等，才出现时间的不可逆性。生命和热力学第二定律都充分表现了时间的不可逆，是否这两个问题之间有什么密切的联系呢？这个问题引起了后来人们的很大兴趣与思考。

麦克斯韦妖 (Maxwell's demon)。

1871年，麦克斯韦在他的《热的理论》一书的最后一章《热力学第二定律的限制》中提出了一个与热力学第二定律相悖的假说。他假想有这样一个神通广大的“妖精”，它能跟踪充满容器的每个气体分子的运动。把这个容器用一道隔板分为A、B两部分，并在隔板上安装一个阀门，当阀门打开时单个气体分子可以从容器的一部分经过阀门进入另一部分去。假设这个容器起先完全充满了一定温度的气体，按照热的动力论，一定的温度对应于分子的一定的平均速度。因为气体分子的运动具有随机性质，有的分子的速度将大于平均值，有的则将小于平均值。那么，通过在适当时刻打开隔板上的阀门，妖精就能让快的分子从A进入B，慢的分子从B进入A，结果不须消耗能量，B部分的温度就上升，A部分的温度就下降。这在前面已作介绍。近一个世纪以来，麦克斯韦妖一直在整个物理学界作祟。这个妖到底是个什么性质的东

西呢！

威廉·汤姆生 (W. Thomson) 是继克劳胥斯之后更详尽地论述了热力学第二定律的物理学家。在麦克斯韦妖提出之前，他就讲过，“动物体并不象一架热机那样动作。……生命活体具有某种直接利用在其体内运动的物质粒子的能力，由于它的作用，这些粒子的运动沿着所希望产生的机械效应的方向前进。”^①实际上，汤姆生已预示了一种支配运动的粒子的能力，只不过把它限制在动物体内。当麦克斯韦妖正式提出后，他评论道：“妖的含义，根据麦克斯韦对这个词的用法，是一个有理智的存在物，它具有自由意志和非常灵敏的触觉，以及感知的机构，使他能去观察和影响物质的各个分子。”^②

1880年，爱丁堡大学的 P. G. 泰特又进一步说明了这个问题。他认为热力学第二定律仅仅是一种统计的正确性，即一种偶然的正确性。他说：“热力学第二定律的真正基础在于极端微小和极大量的物质粒子，因而使它们的平均行为得到稳定。如果我们有个别处理粒子的方法，我们就可以在大尺度上发现在每一团气体中的极小尺度上连续发生的情况：即偶然地、暂时地在一个小范围内集结了较热的粒子，而在另一个范围内集结着较冷的粒子。”^③这种想法在当时并没有引起人们足够的重视。

1913年，由于电子物理学家对象布朗运动这样的涨落现象的分析取得了重大成就，人们又开始重视这个议题。这年，波兰物理学家 M. 斯莫洛绰夫斯基在哥廷根作了一次关于热力学第二定律正确性的限制的讲演，重新申述了这个问题的重要性。为了重新断定第二定律的正确性，斯莫洛绰夫斯基采用了波尔兹曼的几率方法。根据波尔兹曼的说法，一个系统的熵的值与系统的涨落

①②③ W. 爱伦伯格：《麦克斯韦妖》，载《外国自然科学摘译》，1976年第1期。

状态有关。什么是涨落呢？我们举个例子来说明。一个容器经过一段时间后，其中的分子平均分布。但因为分子间以及分子和器壁相碰撞，所以仍在不断改变位置，即在这个容器的一些小尺度内分子数目仍在变，这就是涨落。这种涨落在经典热力学中是不考虑的。斯莫洛绰夫斯基引证了易于观察到的几种涨落情况，定量地估计这些涨落的比率，得出大的涨落是少有的，而小的涨落是常见的结论。所以他认为不需假设麦克斯韦妖一定与单个分子打交道。不过，这里又出现了一个新的困难：一个可以控制熵的状态的装置，本身必须依附于与所希望出现的熵值无关的涨落。因此他推断说原始的小妖不可能是自动的。但是他又指出，一个有智力的存在物如果不断地得到信息，可以操纵这种装置。这样，问题就推给了生物学，特别是对人的研究。

1929年，工程师齐拉德发表了一篇论文：《论有智力的存在物引起的热力学系统的熵的减少》。齐拉德在此引进了一个“记忆”的概念，他认为“记忆”与“智力”指的是同一件事，它们指的都是在过去时间内事件实现状态的记录。他认为，记忆能够引起熵的连续减少。齐拉德曾用这样一个例子来说明用记忆减少熵的程序：考虑一个和周围热接触的汽缸，它有一个分子和一个装置，那个装置首先将一个分离壁或活塞插入汽缸中间，然后向两边移动。如果我们知道这个分子原来在哪一边，我们就可以移动活塞使分子在空间扩大一倍，这样，就可以由于等温膨胀而获得功。在每次膨胀完成时，活塞内汽缸退回去而不作功，这样它又可以再被插入汽缸中从而使实验一直重复做下去。初等热力学表明，在每次膨胀时，保持这个分子的温度或速度的周围热“槽”的熵会减少一定量。齐拉德的研究没有提供具体的模型，但这个研究中却有非常重要的一点，即他把熵与“记忆”（这里的“记忆”实际是一种信息）联系起来了。他认为如果我们不违反第二定律，我们就必须承认建立“记忆”不可避免地要与熵的产生相联

系。由此看到，这种观点实际上在熵和信息之间建立了一种联系，开辟了一条通往信息论及其奥秘的途径。

薛定谔的《生命是什么？》

热力学第二定律（1850年）和生物进化论（1859年）是先后相差几年发现的，以后社会进化的图景也越来越明晰。虽然它们都指示了时间的不可逆性，但热力学第二定律把世界指向死亡。生命和社会的进化则表现出世界的发展，这个矛盾被越来越多的人注意。在热力学第二定律面前，如何去理解生命呢？

1944年，奥地利著名理论物理学家、量子力学理论的创始人之一薛定谔发表了《生命是什么？》这一专著。在书中，薛定谔对上述问题作了独创性的讨论。这本书在西方科学界负有盛名，影响很大。他认为物理学和化学可以解释生命，但物理学和化学还要进一步发展才能胜任这一任务。他综合物理学和生物学等不同领域的事实和理论，用热力学和量子力学来解释生命本质，开拓了研究生命现象的一个新途径。下面就简单介绍一下薛定谔研究这一问题的途径。

薛定谔首先回顾了素朴的物理学家们的一些看法。素朴的物理学家们认为，生命体之所以能表现出一种有秩序的行为，就在于生命体具有“多原子”结构。在生命有机体中起重要作用的物理学和化学定律都是统计学定律。薛定谔用遗传学的实验事实驳斥了上述看法。遗传学研究中基因的发现说明，基因是一种非常小的、不足以显示统计学定律的原子团，可它们却支配着有机体有秩序、有规律的行为，控制着有机体的宏观特性。薛定谔非常重视基因的三种基本特性。一是基因的原子数量很少，一个基因包含的原子不会超过一百万个或几百万个；二是基因的不变性，由此表现为遗传模式的持久性；三是基因的突变，也就是说生物种的突变是基因的变化，因此这种突变才可以遗传。由此薛定谔提出了这样一个问题：从统计物理学的观点来看，基因结构似乎

只包含了很少量的原子，可是它却以奇迹般的不变性表示了最有规律的活动，我们如何使这两方面的事实协调起来呢？

薛定谔企图用量子力学的定律来回答上述问题。他认为，遗传的机制是建立在量子论的基础上的，对此他做了一些具体解释。他认为，许多原子在彼此靠拢时到底形成一种什么构型的系统是原子核无法选择的，我们只能说，原子核的性质只是可以选择大量的、不连续的状态系列，由此就必然会有一种构型向另一种构型的转变，薛定谔称之为量子跃迁。在这两种构型的转变中，如果转变后的构型具有较高的能级，那么外界就至少要供给这个系统以两个能量间的能级差额；如果转变后的构型具有较低的能级，那么这个系统可以通过辐射来消耗多余的能量。薛定谔认为，在原子系统的一组不连续状态中，有一种原子核彼此紧密靠拢的状态，这就是原子组成分子的状态，此时能量最低。如果一种分子要变为另一种分子（例如同分异构体），那么这种转变是不相邻的，只有通过介乎两者之间的中间构型才能发生，这种中间构型的能量比它们当中的哪一种都高。薛定谔以上述理论来解释基因的特性：假定一个基因的结构是一个很大的分子，只能发生不连续的变化。在这种变化中，一定会有一种变化的出现需要外部供给能量，其最简单的方式是“加热”，因此可以用热运动的偶然涨落来解释罕见的自发突变。

薛定谔并不就此满足，他清楚地认识到，要真正了解生命的特征，必须看到，生命物质在服从迄今为止已确立的物理学定律的同时，可能还涉及到至今还没有认识到的其它物理学定律。对此，他也作了一些探讨。他认为生命的特征在于它还在运动，还在新陈代谢。因此，生命不仅仅表现为一种它终究要死亡，要从有序走向无序，而在于它要努力避免很快地衰退为惰性的平衡态。如何做到这一点呢？明白的回答是靠吃、喝、呼吸以及同化，专门的术语叫做新陈代谢。新陈代谢就是交换，但人们与外

界到底在交换什么呢？薛定谔认为把这种交换称为物质的交换或能量的交换都是错误的。他企图用熵的概念来说明这一问题。他认为，自然界中正在进行的每一种事件，都意味着它在其中进行的那部分世界的熵的增加。因此，一个生命有机体在不断地增加它的熵，并趋于接近最大值的熵的危险状态，那就是死亡。要摆脱死亡，也就是说要活着，唯一的办法就是从环境里不断地吸取负熵。有机体就是赖负熵为生的。新陈代谢中的本质的东西，乃是使有机体成功地消除了当它自身活着的时候不得不产生的全部的熵。一个有机体使它本身稳定在一个相当高的有序水平上的办法，就是从它的环境中不断地吸取秩序。高等动物的食物的状态是极为有序的，动物在利用这些食物以后，排泄出来的是其有序性大大降低了的東西，而不是另外的物质或能量。从以上步步深入的分析，总括全书，可得出几条结论性的意见：

1. 我们不能用现有的物理定律（例如统计学定律）完全解释生命物质，这不是由于有什么特殊的力量在支配着生命有机体的行为，而是因为生命物质的构造同迄今物理实验过程中的任何东西都不一样。我们必须去准备发现在生命物质中占支配地位的新的物理学定律。

2. 过去在统计学中一直讲“有序来自无序”，用这种理论解释生命现象，就把生命说成无数原子的无序行动的整体有序效应。而薛定谔认为生命行为明显地以“有序来自有序”的原理为基础，用这种原理解释生命现象会更合理、更简单。

3. 他引进了负熵概念，以引导人们摆脱物质与能量概念的束缚，去深入认识生命的本质。

通讯和控制理论中的熵

就是在薛定谔《生命是什么？》发表的那段时间，熵的概念被另外一些领域即控制、通讯工程领域热烈地讨论着。

下面我们看一看维纳论信息、熵、麦克斯韦妖以及生命。

维纳曾讲：“信息量的概念非常自然地属于统计力学的一个古典概念——熵。正如一个系统中的信息量是它的组织化程度的度量，一个系统的熵就是它的无组织程度的度量；这一个正好是那一个的负数。这个观点引导我们去研究所谓麦克斯韦妖的可能性问题。这些问题也从关于酶和其他催化剂的研究中独立地产生出来，而关于酶和催化剂的研究主要是为了专门了解有生命的物质的新陈代谢和生殖之类的基本现象。”^① 维纳从以下几个方面讨论了热力学、熵、信息与生命的关系：

1. 牛顿时间和柏格森时间。

牛顿力学中的时间是可逆的，这种力学的基本定律不因时间 t 变为 $-t$ 而改变。维纳认为，没有一门科学完全符合于牛顿的严格式样，包括孕育了牛顿力学的古老天文学中都有潮汐进化论。特别是生物学的研究对象则完全是单向的。

维纳指出，由牛顿的时间可逆到吉布斯的时间不可逆这个转变是有哲学方面的反响的。柏格森曾经强调指出物理学的时间和进化论与生物学的时间不同：前者是可逆的，其中没有什么新事物出现；后者是不可逆的，其中总是产生着新奇的事物。因此牛顿物理学不是生物学的适当框架。维纳赞同柏格森的这种观点。

2. 麦克斯韦妖和信息。

齐拉德曾提出过把熵与信息联系起来的假设。当人们对这二者的认识日益深入，这种联系也就明显了。维纳就是把二者联系起来以说明麦克斯韦妖的。他认为，麦克斯韦妖在动作以前，必须收到有关前来的粒子的速度和它们碰到壁上的位置的信息。因此，无论在哪些碰撞中是否发生能量的传递，麦克斯韦妖和气体之间必然要有相互联系。所以，我们关心的不是气体的熵，而是气体—妖这个系统的熵。维纳认为我们完全能求出麦克斯韦妖对

^① 维纳：《控制论》第二版，科学出版社1963年版，第11页。

总熵贡献的那一部分熵。麦克斯韦妖只有根据收到的信息才能动作，而这些信息，表示负熵。这些信息可以在很低的能量下传递，而且粒子与麦克斯韦妖之间能量传递的意义一般比信息传递的意义小得多。但是，根据量子力学的测不准原理，如果我们不积极去影响实验粒子的能量，使得它超过某一极小值，我们要得到有关粒子位置和动量的任何信息那是不可能的，要同时得到位置和动量的任何信息就更不可能了。因此，所有各种联系，严格说来都是能量的耦合；一个处在统计平衡状态的系统，就是对熵和能量这两者都达到平衡的系统。麦克斯韦妖早晚总要陷入和它周围温度相应的无规则运动。维纳在这里否定了麦克斯韦妖的作用，但他又提出了一个“亚稳的麦克斯韦妖”的概念。他认为，在麦克斯韦妖失去调制力以前还是有一段相当显著的时间，我们可以认为它在这段时间中的动作状态是亚稳的。并且维纳认为具有相对持久性的酶就是亚稳的麦克斯韦妖。

3. 生命和稳定性。

维纳认为在人们的认识中，稳定性是很大一部分世界的特征。这是因为在生物序列中，不稳定形式在生存竞争中无力生存下去；而在放射性演变过程中，又由于它变化得很快，以致人们不能象注意到较为稳定的形式那样地注意到它们。由此，维纳认为存在两种自然选择，即不适者毁灭的自然选择和我们以极粗略的方式来考察不稳定事物的自然选择。维纳认为，应该记住，

“在生命现象和行为现象中，使我们感到兴趣的是相对稳定状态，而不是绝对稳定状态。绝对稳定状态只在熵为极大值时才可以得到，其本质就是热寂。但是，当一系统由于它遵守某些条件而不处于热寂状态时，它将使其存在的大部分时间处于这样一些状态：它们不是纯粹平衡的状态，而是近乎平衡的状态。这就是说，熵不是绝对的极大值，而是相对的极大值，或者至少可以这样说，在这些状态附近，变化非常之慢。正是这种近乎平衡的种

种状态，而不是真正的平衡状态，和生命、思想以及一切其他有机过程相联系着。”^①

维纳讨论上面提到的这些问题，是为了研究机器和活的机体中都存在着的有关通信、控制等一系列问题之间的本质联系。维纳认为我们没有什么理由认为生命体活动的基本方式一定和模拟生命体的人造自动机有所不同。自动机可以接受的信息并不受到先验的限制。自动机的发展也是不可逆的。由此可以看出，随着自然科学的综合渗透和深入发展，熵已远远超出经典热力学的范畴，深入到了统计力学、量子理论、通讯理论、控制理论乃至生命、智力等多个领域，由此人们不断丰富着这个概念的内容和加深着对这个概念的理解。

布里渊的总结与发挥

1949年，布里渊在《生命、热力学和控制论》一文中，回顾、总结了关于热力学与生命问题讨论的历史，提出了一些自己的系统的观点。

1. 生命与第二定律的关系。

他明确指出，热力学的两个定律只能适用于孤立系统，这种系统处于封闭状态中，它不透热，不能做功，也不能与外界交换物质和辐射。第二定律意味着由于禁闭而致死亡。生命经常受到这种死亡宣判的威胁，避免死亡的唯一方法就是冲破禁闭。

布里渊指出在两种情况中观察不到熵的变化。一是系统所经历的是可逆转变时，它的总熵保持不变，这就是热力学中所讨论的可逆循环的情况；另一种情况是一向被人们所忽视的，即处于不稳定平衡中的系统的情况。我们所有的燃料资源、动力资源都是处于不稳定的平衡系统，几千年以来，铀一直保持稳定和静止

^① 维纳：《比其制造者更为聪明的机器》，载《控制论哲学问题译文集》，商务印书馆1956年版，第60—61页。

的状态，后来有些科学家用它建成了反应堆和炸弹。这类事情在一个严格遵从第二定律的世界中是不可能发生的。布里渊认为，燃料、动力资源其实就是负熵的储存库，在这些结构中，由于某种奇迹，不发生正常的、自然的熵增加反应，直到人类出现，象一种催化剂那样，才促使它发生。如此巨大的负熵储存怎么可能保持原封不动呢？维持和保有这些能量储存的负催化作用的机制是什么呢？布里渊认为这是一个未解决的重大问题。

布里渊深入探讨了生命及其第二定律的关系。首先，因为地球不是一个封闭系统，太阳的热和雨造成农作物，农作物提供粮食，这种循环可以看作是，先要有不稳定平衡的创造物（燃料、粮食、瀑布等等）；然后，是所有生物对这些资源的使用。生命“由于生活在一个非禁闭的、非封闭的世界中，这就避免了由于禁闭而致死亡的宣判”^①。其次，生命机体是一个处在不稳定平衡中的化学系统，“生命力”本身表现为一种负催化剂，只要生命持续着，机体就保持着它的不稳定结构，可以免遭解体。它可以把正常的、一般的分解过程减缓到恰好是一生这样的速度。第三，布里渊认为，生命机体的熵含量是一个毫无意义的概念。1946年，布利治曼就热力学定律应用于生命系统的可能性问题提出了一个问题：怎么去计算或估计一个生物的熵呢？布里渊认为，要计算一个系统的熵，就要能以可逆的方式把它创造出来或破坏它。而我们不能用什么可逆的过程把生命机体创造出来或者消灭掉：出生和死亡都是不可逆过程。在讨论一切涉及到生命机体的实验时，生物学家总是假定生命体的熵在它活动的时期实际上保持不变，以避免这个困难。因此这个假定只能是一个大胆的假说，不可能予以证实。第四，关于麦克斯韦妖，布里渊认为，从

① 布里渊：《生命、热力学和控制论》，载《控制论哲学问题译文集》，商务印书馆1956年版，第163页。

亚微观的尺度上看，这个亚微观活物的动作是不可想像的，因为这违反第二定律。但小尺度上不许可的事情在大尺度上是许可的。如人在气候炎热的时候就把窗户打开，天冷时就把它关上。大系统可以长时间地保持不稳定平衡状态。生命就是靠所有这些在第二定律的边缘上发生的例外情况进行的。当然，窗户的关闭之所以可以调节室内温度，其前提条件是地球上的大气不是处于平衡状态，而且不是恒温，这又回到了地球不是封闭系统的前提。

2. 熵和智力。

布里渊很重视维纳关于信息量是负熵的观点，认为它为熵概念的某些重要推广开辟了一条道路。布里渊认为熵概念的推广具有非常重要的意义，他举了几个例子来说明维纳推广熵概念的意义。例如，有一份纽约时报，一本关于控制论的书和同等重量的一堆废纸，它们有同样多的熵吗？按照一般的物理意义，答案是肯定的。但对一个有知识的读者说来，这三札纸里所包含的信息量是极不相同的。又如，一座小石山，一座金字塔和一道设在水力发电站的堤坝，也许三者的物理熵差不多，但其中专门技能的总量是完全不同的，即它们的信息量有差别。

布里渊指出，按照维纳所指的方向仔细研究一下这些问题也许对生命本身的研究有某些重要贡献。智力是生命的产物，对思维能力的进一步理解可能会对这个极有意义的问题提出一个新的论点。

布里渊在这里发挥了这样一个思想：即同光学研究中区分辐射的本性与观测者的行为类似，要把广义熵的定义应用于“信息”之上，并且把它同观测者的特殊感受性区分开来。他认为这一区分比光的情形更困难。

布里渊在讨论了上述问题后，指出了这个领域的两个重要发展方向：一是进一步理解催化作用，因为生命肯定是靠某些负催

化作用的机制来维持的；二是按照维纳所建议的，广泛地推广熵的概念，使它能应用于生命机体，从而给生命机体的熵的定义以合理的答案。布里渊的整个讨论哲学味道很浓，他思考问题的方式也很有独特之处。不过他的许多想法是处在假设阶段。

第三节 耗散结构理论、协同学 与自组织系统理论

在熵的概念被引进越来越多的科学领域的同时，热力学本身也在迅速地发展。越来越多的物理学家认识到，经典热力学适用于生物学遇到很大的困难，因此应研究和发展热力学。

在经典热力学和经典统计物理学阶段，主要研究的是与外界不发生物质和能量交换的理想化的孤立系统。在这种系统中，根据热力学第二定律得到了熵增加原理。如何从微观上来解释这一宏观上的时间不可逆规律呢？波尔兹曼主张微观过程是可逆的，他企图用概率的大小来说明宏观的不可逆现象，但并没有取得预期的结果。应该说，直到本世纪初，虽然有热力学第二定律，但研究得比较充分的是可逆过程的平衡态热力学。

1931年，在微观可逆性原理的基础上，昂赛格把宏观和微观的物理概念结合起来，推导出“昂赛格倒易关系”；1947年，普里高津提出了最小熵产生原理。这二者是不可逆过程热力学的理论基础。不可逆过程热力学主要是研究接近平衡态的线性非平衡区域热运动所服从的规律，研究的对象已由孤立系统扩展到封闭与开放系统，但在这类开放系统中，温度、浓度梯度、势梯度和热流、扩散流、电流之间的变化必须服从严格的线性关系。这个不可逆过程热力学也可称为线性非平衡热力学。近十多年来，人们的注意力开始主要集中到研究远离平衡态的非线性的热力学

和统计物理方面，出现了以柯罗曼为代表的合理热力学学派和以普里高津为代表的广义热力学学派。普里高津从原有的近平衡态推向远离平衡态的研究，他一方面尽量利用原有的理论和方法，一方面又提出了一些新的概念和原理，1969年，他在一次“理论物理学与生物学”会议上正式提出了耗散结构理论，并逐步严格地从物理和数学方面论证了耗散结构的存在。

在简要地介绍这一学派的内容大意之前，先说明一下有关的基本概念：

两种不同的系统

人们在研究热力学系统时，发现有两类不同的系统，一类是与外界既没有物质交换，又没有能量交换的系统，称为孤立系统。

根据热力学第二定律，这种孤立系统的内部宏观状态总是随着时间的持续趋于平衡的，到那时，系统的内部宏观状态不再随着时间发生变化。这种现象在日常生活中是很普遍的，例如，在一个中间有隔板的容器中，把一些蓝墨水滴入其中的一边，然后抽开隔板，蓝墨水很快就向另一边扩散，最后两边浓度变成一样了。

在热力学中，系统内部宏观状态趋于平衡的这种现象可用熵增大来描述。它指出在孤立系统中，熵总是在不断增加的，熵的变化总是大于零的，一直到熵达到极大值。

后来，波尔兹曼指出了这种孤立系统内部宏观状态总是不断趋于平衡，熵不断增加的微观意义，即系统的熵增加实际上标志着系统内部微观分子运动的无序性的增加，有序性的减少。

什么是无序性、有序性？从上面讲过的蓝墨水的例子来看，我们假设蓝墨水是由一些蓝色的元素构成的，水是由一些白色的元素构成的，一共有 N 个元素，它们盛在一个容器中，中间由一个可渗透的隔板隔着，那么这 N 个元素任意分成 N_1 和 N_2 两组的分

法一共有 P 种, $P = \frac{N!}{N_1! N_2!}$ 。无论对于那种分法, 都可以发现经过一段时间之后, 在容器中除了微小的局部变化外, 宏观上都能达到平衡状态, 微观上则是元素在两个间隔当中均匀地分布着 ($N_1 = N_2 = \frac{N}{2}$)。不难看出, 在这一状态时, P 为极大值。

因为 P 是指 N_1 和 N_2 分法的数目, 当 P 为极大时, 表示 N_1 和 N_2 的分法数目为最多, 这就意味着每个元素的位置越不确定, 系统的微观状态就越混乱。这种现象使波尔兹曼认为 P 与熵的关系为 $S = k \log p$ (k 为波尔兹曼常数)。这一关系式明确地指出, 熵的增加表示分子无序性的增加, 熵减少表示分子的有序性增加。

在自然界中, 除了孤立系统以外, 还存在着另一种系统, 它与周围环境自由地进行物质和能量的交换, 这就是我们已经在前面提到过的开放系统。如吞食食物的变形虫就是开放系统的一个例子。一个工厂也可以看成是一个开放系统, 它不断地输入原料和燃料, 同时又输出制成的产品和废料。

这种系统与孤立系统有着明显的区别, 它的内部状态随着时间的持续, 无序性总是自发地减少, 有序性总是自发地增加。一个变形虫随着时间的持续, 由小变大直到成熟分裂。一个工厂随着时间的持续, 它的产品数量不断增加, 产品质量不断提高。这样一类系统完全不遵从热力学第二定律, 而是遵从达尔文的进化学说。这种系统在进化中若表现出自组织性, 则称自组织系统。

这样两种不同的甚至是矛盾的系统之间有没有内在联系? 它们之间的关系是什么? 这实际上是从一个更一般的角度重提热力学第二定律与生命进化的关系问题。

耗散结构理论的出发点

1969年普里高津提出的耗散结构理论就是建立在对第二定律的研究之上的。他把热力学系统分为三种: 一是孤立系统, 它跟其

周围的环境不产生物质和能量的交换；二是封闭系统，它只与外界交换能量；三是开放系统，它与外界交换能量和物质。第二定律引进了熵这种新的系统状态函数，熵与外界的能量交换有联系，但它与能量相反，是不守恒的。熵的增加是外界供应的熵和系统内部产生的熵的总和。第二定律表明系统内部产生的熵大于或等于零。对于孤立系统来说，外界供应的熵等于零，因此它的总熵的变化大于或等于零，等号只有在系统经过长时间而达到的平衡状态下才能实现。因此，普里高津提出：有条不紊的高度有序的生物结构，可以解释为受热力学第二定律支配的平衡状态吗？他认为要回答这个问题，首先要了解生命系统的重要特征。普里高津紧紧抓住生物的有序这一特征进行分析，他认为生物有序的具体特征是很微妙的：（1）即使在最简单的细胞中，正常的新陈代谢也要引起大量耦合的化学反应，因此，有对应于这些过程就形成极复杂而奥妙的功能上的有序。（2）新陈代谢还要有特定的催化剂——酶，这是一些空间结构很复杂的高分子。因此，生物的有序将包括结构有序和功能有序。另外“在细胞和超细胞水平上，这种有序还须通过一系列越来越复杂的、相互对应的结构和功能才会体现出来。这种等级特征是生物学有序的最显著的特征之一。”^① 如何把第二定律同这种生命的有序特征协调起来呢？普里高津不满足于一般流行的解释，他认为现在生物学家都认为，熵增加定理适用于整个系统，即适用于生命系统再加上它的环境。因此，整个系统的熵增加，就等于形成组织结构的生命系统内的熵的减少。他认为这种分析问题的方法，对于我们了解生命系统的进化和分子组织的机制都毫无帮助，我们不能只满足于生命系统的进化是否对应于宇宙的熵的增加，能否符合热

① 普里高津：《生命与热力学》，载《外国自然科学摘译》，1974年第1期。

力学第二定律，而是应该研究能否用热力学来阐明生命系统自身的进化过程。这就是普里高津研究问题的出发点，由此他引进了“耗散结构”这一新的概念。

“耗散结构”概念

要理解耗散结构概念，仍要从上述关于不同系统的分析出发，在此将上述的有些思想加以较严格的论述。

任何一个系统的熵的变化 ds 都由两部分组成：

$$ds = d_e s + d_i s$$

第一项 $d_e s$ 是系统与外界交换物质和能量而引起的熵流，第二项 $d_i s$ 是系统内部自发产生的熵。因此任何一个系统的 ds 总是大于或等于零的（当平衡时等于0），开放系统也不例外，而 $d_e s$ 则因不同的系统而有不同的情况。

在孤立系统中，没有熵流， $d_e s = 0$ ，因此这个系统的 $ds > 0$ （在平衡时 $ds = 0$ ），总是熵增加，无序度增大，从这里我们也可以看出孤立系统只是开放系统的一个特例。

反之，当一个系统的熵流 $d_e s$ 不等于0时，系统并不一定会使有序性增加。这要作具体分析，存在着三种情况：

第一种情况是热力学平衡态。在这种系统中，虽然 $d_e s$ 不等于0，但它是大于0的，所以物质流和能量流的进入便大大增加了系统的总熵，加速了系统趋向平衡态的运动。

第二种情况是线性非平衡态，这种状态与平衡只有一点点微小的差别， $d_e s \approx 0$ ，这种系统即使开始存在时有一些有序结构，但最终抵抗不了系统内部自发产生的熵的破坏，从而最终趋于平衡，而不可能出现任何新的结构和组织。

第三种情况则完全不同了，这种系统远离平衡态，也就是说 $d_e s \ll 0$ ，系统不断地从环境中获取物质和能量，这些物质和能量给系统带来了负熵，结果使整个系统的有序性的增加大于

无序性的增加，在具备一定条件下，就能自发地形成新的有序结构和新的组织，称为耗散结构，如生命系统、社会系统都是这种耗散结构。

由此可见，一个远离平衡的开放系统（不管是力学的、物理的、化学的、生物的、社会的等），通过不断地与外界交换能量和物质，在外界条件变化达到某一特定阈值时，量变可能引起质变，系统有可能从原来的无序状态转变为一种时间、空间或功能的有序状态。所以说，非平衡是有序之源。

普里高津本人曾对耗散结构有一个比较简单通俗的介绍：

“生物和社会组织包含一种新型的结构；它与平衡结构例如晶体有不同的来源，要求有不同的解释。社会和生物的结构的一个共同特性是它们产生于开放系统，而且这种组织只有与周围环境的介质进行物质和能量的交换才能维持生命力。然而，只是一个开放系统并没有充分的条件保证出现这种结构。……只有在系统保持‘远离平衡’和在系统的不同元素之间存在着‘非线性’的机制的条件下，耗散结构才可能出现。一个开放系统可能有三种不同的存在方式：第一种方式是热力学平衡态。在这里经过流动已经消除了温度和浓度的差别，熵增加到一个新的较大的值，从而达到了一致。对于孤立系统，分子处于完全无序状态，熵极大，平衡态由波尔兹曼有序原理决定。第二种可能的方式与平衡只有一点微小的差别，只是系统内部的温度和浓度保持有一点小小的不同。因而它保持近于平衡。如果这种对平衡的偏离是足够的小，于是我们可以用对平衡态加上一个小的修正来分析这种系统——因此把这种系统叫做‘线性非平衡态’。然而，对于这种状态，可以表明，系统向尽可能靠近分子完全无序的状态运动。因此任何新的结构和组织都不可能出现。然而，对于第三种可能的方式，情况变得完全不同，这是在强制力保持一定的值，迫使系统远离平衡时产生的结果。在这种情况下，新的结构和新型的组织能够

自发地形成，这叫作‘耗散结构’。”^①

形成耗散结构的条件

耗散结构理论认为耗散结构的形成需要三个条件：一是系统必须是远离平衡态的开放系统；二是系统的不同元素之间存在着非线性的作用。例如，为温度梯度所规定的液体特性可以用流体、动力学方程来描述。在这类方程中就会出现非线性特点。一个典型的实验是贝纳德（Benard）现象。对一盛有液体的平底容器缓慢加热，热通过传导方式在液体中通过。当缓慢加热到某一完全确定的温度梯度时，从一定角度看，对流的元胞就会突然出现很规则的六角形花纹。这就是一种耗散结构。第三，要有涨落的触发。这在下面再说明。

耗散结构的稳定性

我们在前面讨论了耗散结构的形成，即一个远离平衡的开放系统是能够在一定条件下形成耗散结构的，它自发地趋向于有序。但这种有序性要能保持下来时才有意义。而耗散结构是建立在非平衡态基础上的，那么它能够保持下来吗？这是一个必须回答的问题。这就是它的稳定性问题。

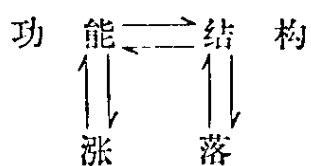
前面已指出，一个耗散结构是由许多元素之间的非线性的相互作用形成的。这些元素的运动具有随机性。这样，耗散结构的每个存在状态都必然受到小的局部的扰动，这种扰动对耗散结构会产生什么样的影响？这是讨论稳定性问题的关键。

稳定性问题与涨落密切相关，耗散结构理论对涨落进行了深入的分析^②。首先，在平衡态中涨落没有什么作用。其次，在接

① 普里高津：《复杂性的进化和自然界的定律》，载《自然科学哲学问题》1980年第3期。

② 参看沈小峰、湛垦华：《耗散结构理论和自然辩证法》，载《自然辩证法通讯》1980年第2期，第43页。

近平衡态的线性非平衡区，涨落的发生只会使系统状态发生暂时的偏离，而这种偏离状态会不断衰减直到消失，最后回到稳定的状态，如一个钟的摆，运动到最后总会停在中间的稳定位置。这种系统不可能形成新的结构。第三，在远离平衡态的非线性区，系统处于一种动态的平衡之中，这时系统的一个微观随机的小扰动就会通过相干作用得到放大，成为一个整体的、宏观的“巨涨落”，使系统进入不稳定态，从而又跃迁到一个新的稳定的有序状态。在这里涨落对于耗散结构的形成起了一个触发的作用。因此系统的涨落就不再是一个干扰的因素，而是耗散结构形成的杠杆。普里高津曾用一个循环图式来描述系统的功能、结构和涨落之间的关系。



耗散结构理论的系统进化观

耗散结构理论的提出，对于热力学第二定律提出以来就存在的所谓时间的可逆性和不可逆性、平衡态和非平衡态、有序和无序等问题的讨论有所推动，在这些问题上形成了他们自己新的独树一帜的观点和看法。

时间的不可逆性是普里高津等人理论研究的出发点。他们不同意把热力学第二定律所描述的趋向平衡的发展观与自然界及社会现象中总结出来的由简单到复杂，由低级到高级的发展观对立起来。他们认为，这些现象由同样的规律支配，只不过前者处于热力学分支点之前，后者处于热力学分支点之后远离平衡与外界有能量和物质交换的系统中。他采用了薛定谔最早提出的负熵流的概念，使得在不违反热力学第二定律的条件下，非平衡系统可以通过负熵流来减少总熵，达到一种新的稳定的有序状态，即耗

散结构状态。

普里高津用耗散结构来解释生物系统的有序与进化，认为进行新陈代谢和繁殖的生物系统总要跟它的周围环境交换能量和物质，因此，它是作为开放系统发挥作用的。另外，正如我们强调过的，生命的保持和发育是跟大量的化学反应和运输过程分不开的，是由许多高度非线性的复杂因素，如激活、抑制、直接的自身催化等连锁控制着的。因此，能量与物质的供给一般是在非平衡条件下进行的，因为反应产物或是被生命系统所排出，或是被送到细胞的其他部分，以满足其他功能的需要。可见，生物系统的结构与功能也为耗散结构的出现准备了必要条件。

因此，普里高津认为生命决不违背物理学定律，生命和非生命之间没有绝对的界限，生命和非生命之间的鸿沟，是可以跨越的。

但是，这里应该指出的是耗散结构理论对于自组织系统的探索还仅仅是初步的，系统的有序性、自组织性的理论还需要不断地发展、完善。

协同学的产生

继耗散结构理论之后，70年代又出现了另一门新的自组织系统理论，即协同学（Synergetics）。它与耗散结构理论一样，也研究了一个系统如何能够自发地产生一定的有序结构。但是，它是在不同学科的研究领域中，通过同类现象的类比而找出它们产生有序结构的共同规律的。协同学的数学模型和处理方案不受热力学概念的限制，而且以信息论、控制论、突变论等现代理论为基础，采用普适性很强的统计学和动力学考查相结合的办法，因而更深刻地揭示了各种系统和现象中从无序向有序转变的共同规律。

协同学的创始人是联邦德国斯图加特大学理论物理学教授赫尔曼·哈肯（Herman Haken）。他在60年代研究激光理论的基础

上，于1973年首次提出了“协同”的概念，1976年出版了《协同学导论》这一专著，1978年又发行了第二版，增加了“混沌态”一章，1983年出版了《高等协同学》，使协同学从孕育、诞生走向成熟。

哈肯在60年代研究激光理论时发现激光的形成过程是一种典型的非平衡开放系统从无序转化为有序的现象，并且其中呈现出丰富的合作现象。一个固体激光器，在外界输入的泵浦能量较低时，激光棒中的激活原子彼此独立地发出一列列不相干的光波，整个光场系统处于无序状态，这时的激光器就象一只普通的灯，发出相位和方向都无规则的自然光。当泵浦功率增大到某一特定的阈值时，大量激活原子会同步地发出同频率的光波，激光器则发出相位和方向都整齐一致的单色光——激光，光场系统处于非平衡的有序状态。一旦泵浦能量低于阈值，这种非平衡的有序状态立刻瓦解。为了进一步探讨激光形成的过程和微观机制，哈肯开始寻求非平衡有序结构形成的规律。他发现在其它许多领域中也存在着类似的非平衡有序结构形成的现象。例如，流体力学中贝纳德花纹的形成，化学反应中出现的颜色由红变兰、再由兰变红的B—Z反应，生物学中由生存竞争造成的野兔数目和其天敌山猫数目随时间的变化而发生的周期性的“时间振荡”等。这些非平衡有序结构形成过程中同样存在着大量丰富的合作现象。这种需要一定外流来维持所出现的宏观有序结构的现象称为非平衡相变。

哈肯还发现，不仅在这种远离平衡态的开放系统中，就是在热力学平衡系统中也存在着类似的转化过程。例如，某些金属合金在其温度低于某一临界温度时电阻突然消失的超导现象、磁铁有序结构的形成等。一块磁铁，从微观上看，是由许多小磁体组成的。在高温状态下，磁铁中的各个小磁体的指向是不规则的、杂乱的，在这种情况下，大量小磁体的磁矩相加时就相互抵消，整

个磁铁在宏观上不呈磁性。但是当磁铁的温度降低到临界温度之下，小磁体就整齐地排列起来，大量小磁体的磁矩相加时不会相互抵消，使整个磁铁在宏观上呈现出磁性来。这种不需要外界能量和物质来维持所形成的有序结构的稳定，称为平衡相变。

通过非平衡相变与平衡相变以及非平衡相变之间的类比，哈肯得出了“协同”的概念，并且进一步指出，一个系统从无序向有序转化的关键并不在于热力学平衡还是不平衡，也不在于离平衡态有多远，而在于只要是一个由大量子系统构成的系统，在一定条件下，它的子系统之间通过非线性的相互作用就能够产生时间结构、空间结构或时空结构，形成一定功能的自组织结构，表现出新的有序状态。这一观点正是协同思想的精髓。

协同学的基本观点

协同学用序参量来描述一个系统宏观有序的程度，用序参量的变化来刻画系统从无序向有序的转变。如果系统处于完全无序的混浊态时，其序参量为零，当外界条件接近临界点时，序参量增大很快，最后在临界区域，序参量突变到极大值。序参量的突变意味着宏观有序结构的出现。但是一个系统的变量有成千上万，选择哪一个或哪几个参量作为序参量呢？哈肯具体分析了系统中不同参量在临界点处的行为，他发现，大多数参量在系统受到干扰而产生不稳定性时，总是企图使系统重新回到稳定状态，这种参量起了一种类似阻尼的作用，并且它衰减很快，对系统向有序结构转变的整个进程没有明确的影响，称为快弛豫变量，或快变量。另外一些参量（一个或几个）在系统受到干扰产生不稳定性时，总是使系统离开稳定状态走向非稳定状态，出现临界无阻尼现象。它不仅不衰减，而且始终左右着演化的进程，称为慢弛豫变量，或慢变量。慢变量主宰着系统演化的整个进程，决定着演化结果所出现的结构与功能，它就是表示系统有序程度的序参量。这种利用长寿命的参量作为序参量的方法，正是协同学的独

到之处。

哈肯还提出了“伺服原理”，即快变量服从慢变量，序参量支配着子系统的行为。伺服原理的基本思想是统计物理中的绝热消去原理。所谓绝热消去原理是指系统处在阈值时，有序结构形成的速度很快，外界对系统的影响可以忽略；而在系统内部又可以忽略快弛豫变量的变化，即用慢弛豫变量表示（或近似表示）所有快弛豫变量，得到只包含一个或几个参量的序参量方程。经过这样的绝热处理，不仅消去了大量自由度，使方程易于求解，而且深刻反映出子系统之间的协同作用。序参量支配着其它参量的变化，主宰着演化的进程，同时其它参量的变化也通过耦合和反馈牵制着序参量，他们之间互相依赖，又在序参量的主导下协同一致，从而形成一个不受外界作用和内部涨落影响的自组织结构。

协同导致有序还表现在序参量之间的协作与竞争上。有些系统同时存在着几个序参量，每一个序参量又决定着一种宏观结构，最终出现哪一种结构，要由序参量间的协作与竞争的结果来定。由于衰减常数相近，它们会自动妥协，协同一致共同形成系统的一种有序结构。随着外界条件的变化，这种合作行为遭到破坏，在新的阈值时，竞争导致只有一个序参量主宰系统的有序结构。贝纳德花纹在液体上下表面的温度差达到一定阈值时，呈现出六角形的蜂窝状；而当温度差继续上升达到一个新的阈值时又呈现出滚动的卷筒状结构就是一个典型的例子（见图15·3）。这种序参量之间的协同合作与竞争决定着系统从无序到有序的演化进程。

系统内部的随机涨落是推动系统进行转变的决定因素。协同学中序参量的变化实际上是指系统相应的统计平均值的变化。当消去了大量慢变量对序参量的影响后，还存在着序参量偏离平均值的涨落。在通常情况下，这种涨落对系统的进程并不起多大作用，而当外界条件达到临界阈值时，系统处于不稳定平衡，涨落

便会被骤然放大，把系统推进到新的稳定平衡状态。

哈肯在创立协同学过程中有许多科学方法论的思考和运用。例如，他考察问题的特点是把确定性与不确定性结合起来。在描

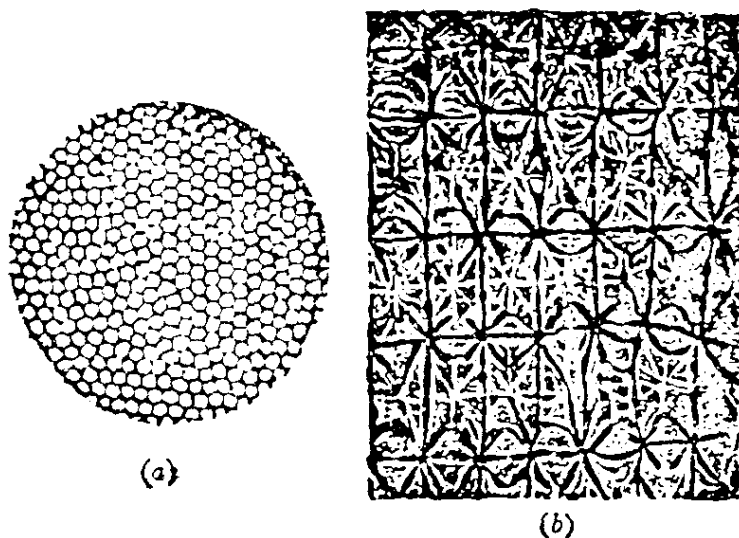


图15·3 贝纳德不稳定性所呈现的卷筒状结构

(a)六角形结构(b)在液面上面观察

述开放系统有序状态的序参量演化方程中，既包含有确定性的驱动力，也包含有随机性的涨落力，可以一般地表示为：

$$\dot{q} = N(q, \nabla, \sigma, r; t) + F(t)$$

式中 q 是序参量， N 是非线性驱动力， F 是涨落力， σ 是控制参量。当忽略涨落力时，从非线性的确定性方程中可以引出二分支的概念，使系统有可能在外界条件达到阈值时，从稳定平衡位置变到非稳定平衡位置；当考虑涨落力后，系统又从非稳定平衡位置进到新的稳定平衡位置。这也说明了开放系统与涨落是自组织系统形成的两个条件。

类比方法的使用。协同学研究的非平衡系统（物理的和非物理的），在临界点上所发生的相变或类似于相变的现象与热平衡中的相变严格地对应着。这种平衡相变与非平衡相变之间的类同，以及不同学科不同现象之间的类同，使协同学在研究方法上

可以采用类比的方法。对分立的序参量，其演化方程可以归结为福克—普朗克方程，而连续介质的序参量方程又可以归结为广义金兹堡—朗道方程。这种类比，使人容易掌握新现象的基本特征和新学科的一些特点。

突变论的应用。在有序结构形成的分类上，哈肯采用了法国数学家托姆的突变论。突变论是一门新兴的数学分支，是以不连续现象为研究对象的。它以系统结构稳定性的研究为基本出发点，认为突变现象的本质是系统从一种稳定结构跃迁到另一种稳定结构。当描述系统状态的势函数处于某种极限时，系统的结构才是稳定的。因为势函数的极值可能有多个，所以系统的稳定状态也不止一个。突变论采用动态系统的拓朴原理来构造突变的类型，对形形色色的突变现象进行了分类。当控制参量的个数不超过5时，共有11种突变类型，当控制参量的个数不超过4时，只有7种基本的突变类型（折迭型、尖点型、燕尾型、蝴蝶型、双曲型、椭圆型和抛物型）。在协同学中，把序参量方程化为标准形式，然后按序参量势函数的形式进行分类，就可以知道它形成有序结构过程的大致情况。

总之，协同学生动地描绘了非平衡系统从无序向有序转化的微观机制，说明了序参量与子系统以及序参量之间的协同、竞争是形成自组织结构的内在根据。协同学的研究与应用已引起自然科学界与社会科学界的极大关注。

协同学的新进展

早期的耗散结构理论和协同学主要研究了自组织系统从无序到有序的演化机制。1978年，哈肯在他的一篇题为《协同学：最新趋势与发展》的论文中，把协同学的内容扩大到功能有序。然而，系统形成有序结构之后又向何处去？倒退回无序态是可能的，但不是唯一的。1979年后，哈肯等人通过进一步的观察与研究，认识到系统还会走向自组织的高级阶段，即从有序走向混沌。

混沌是近年来数学、理论物理、系统动力学等不同学科的学者开始研究的一种新的运动形态。哈肯曾给混沌下了一个定义：

“混沌性为来源于决定性方程的无规运动。”其实自然界存在着大量的混沌现象。激光器在泵浦功率达到一定阈值时会发出激光来，当泵浦功率超过第二个阈值时，激光器又会发出很强且短的周期脉冲。在不同条件下，光幅射又会变成混沌或湍流。形成滚筒状的贝纳德花纹，在继续加温时，振荡运动会失去完好的周期性，呈现一种“表观”无序的湍流。此外，某些星体的混沌轨道、地磁场方向的混沌性质（古地磁资料表明，地磁场的方向在4百万年中至少随机地改变了16次）、以及社会、经济领域中的混沌现象，都反映出混沌是自然界的一种普遍的非线性现象。

混沌是由确定的发展过程中产生出来的随机运动。它决不是简单的无序，更象是不具备明显周期性和其它明显对称性特征的有序态。在理想情况下，混沌状态具有无穷的内部结构，只要有足够精密的观察手段，就可以在混沌态之间发现周期或准周期运动以及在更小尺度上重复出现的混沌运动。

当我们用相空间来描述混沌运动时，它又可称为奇怪吸引子。相空间是我们用描述系统的独立运动变量构成的空间。取相空间中任何一点作为出发点，随着时间的变化，系统的运动在相空间上描绘出的轨迹最终会聚于一定的流形上，如聚在一个点上（图15·4），则这个点称为一个吸引子，它表示系统的一种稳定

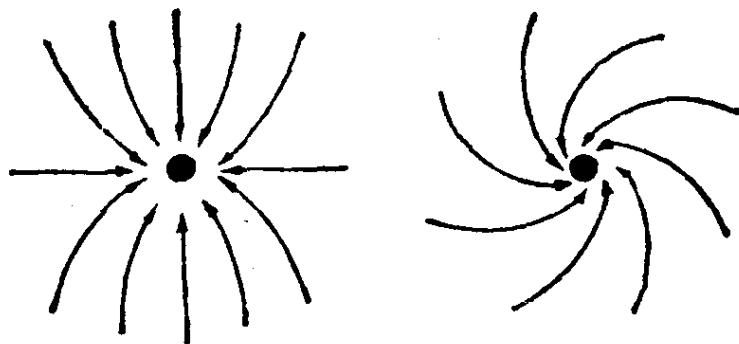


图 15·4

的空间结构。若系统运动的轨迹逼近一个环面上（图15·5），这个环叫极限环，也是一种吸引子，它对应系统的周期振荡。这两种吸引子叫做平庸吸引子。而混沌与这两者不同，在相空间的任一起点，系统的运动都会被吸引到某一特定区域里并将永远在这个区域中停留，但轨线不在一定的流形上而表现出不规则的运动，称为奇怪吸引子。

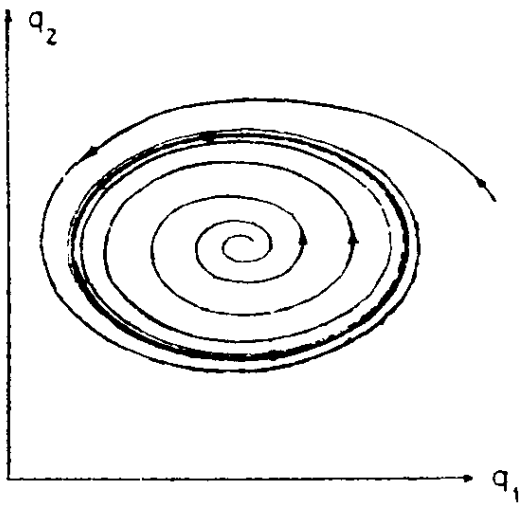


图15·5

这时相当于系统失稳而进入奇怪吸引子。现在人们发现，耗散系统的演化，趋向稳定的平庸吸引子的可能性不大，更有可能出现的是奇怪吸引子。系统运动的轨线在相空间中的几何形态是用分数维几何进行描述的。奇异吸引子分数维的大小在一定程度上表现了混沌态行为的复杂程度。

通过对混沌运动的研究，有助于人们对自组织系统演化规律的认识。哈肯等人认为，无论是人造系统还是自然系统，当外界的控制参量不断改变时，大都会经历一个从无序到有序、从有序到有序、从有序到混沌的演化序列。

从上述激光等例子中可以看出，各种人造系统符合这个演化序列。在自然系统中，大至人类目前所能认识到的银河系、河外星系、本星系群，小至组成宏观世界的分子、原子、粒子和夸克，都存在着明显的层次性。生命系统的亿万年演化进程，从无机物——有机物——生物大分子——植物——动物——人类，也是不断地在外界环境的不同作用下，完成了各个层次上的自组织过程。人类社会也是随着科学技术的不断发展，从自然界获取了越来越多的物质流、能量流和信息流。正是这些外部控制参量的不

断增大，才使人类社会完成了从原始社会到现代的几个不同社会历史阶段的自组织过程。

哈肯在高等协同学中正是研究了系统从无序到有序以及从有序到高级有序的演化序列。在研究过程中，他发展了绝热消去原理，提出了慢流形定理和中心流形定理。这两个定理是为了描述系统在相空间的轨道而提出的。慢流形就相当于系统中的慢弛豫变量的轨迹，如果相空间中存在快流形和慢流形，系统最终会稳定地运动到慢流形上。而中心流形定理，是指在该流形的轨迹上，系统的行为属于中性的，即对外界的扰动既不放大也不缩小，其状态相当于处在指数增大和指数衰减之间的边缘状态，若出现这种情况，系统会稳定在中心流形上。

绝热消去原理、慢流形定理和中心流形定理都反映了序参量支配子系统、子系统伺服于序参量而协同合作形成宏观结构的同一内容，因而把这三个定理统称为伺服原理。伺服原理的这种开拓，使得高等协同学能以统一的数学语言来解决系统的演化序列。

综上所述，事物发展的方向不是唯一的，既不是直线地、无限地趋于复杂化和有序化，也不是直线地、无限地趋于简单化和无序化。达尔文的进化论所反映的系统从无序走向有序，以及克劳修斯的热力学第二定律反映的系统从有序走向无序，都仅仅是宇宙演化序列中的一个环节。所以耗散结构理论和协同学从有序与无序相互转化的角度，初步把热力学第二定律与生命进化的矛盾统一了起来。

超循环理论的提出

“超循环”(hypeicycle)理论也是目前非平衡系统的自组织理论中的一个重要学派。它是从生物领域入手来研究非平衡系统的自组织问题的。它由联邦德国马克斯—普朗克研究所生物物理化学研究所所长爱根(M.Eigen)教授于1971年提出。中心思想是要

说明：在生命起源和发展的化学进化阶段和生物学进化阶段之间，有一个分子自组织阶段，在这个阶段形成了今日人们发现的具有统一的遗传密码的细胞结构。这种统一的遗传密码的形成并不在于它是进化进程中唯一可以进行的选择，而是因为在这一阶段形成了一种超循环式的组织，这种组织具有“一旦建立，就永存下去”的选择机制。总之，爱根等人认为“进化原理可理解为分子水平上的自组织”，最终“从物质的已知性质来导出达尔文的原理”^①。

超循环的基本概念

自然界的循环现象很多，如生命循环等等，爱根所研究的是如下的循环。

爱根首先从反应循环入手，提出了反应循环的概念。反应循环是这样一种反应序列，其中任何一步的某一产物是先前某一步的反应物。例如生物体内最简单的酶促反应就是这样的一种反应循环。催化剂酶E先和一个参与反应物质S结合形成一中间复合物ES，ES变为EP，EP又分解为生物P和原有的酶E（见图15·6）。

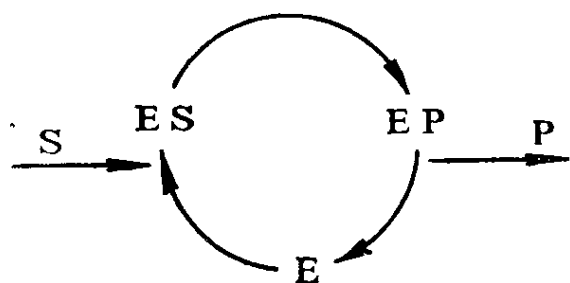


图15·6 酶促反应

在生物体内还有许多由这种简单的反应循环所构成的复杂循环，但它们同是低级的循环。例如，著名的呼吸作用中的三羧酸循环(Krebs循环)，光合作用中的卡尔文循环等。从化学动力学性质

看，这种普通的反应循环可以看作是一级反应，即反应速度正比于反应物浓度，产物随时间而线性增大，底物浓度受到缓冲时不变。

① 爱根：《物质的自组织和生物高分子进化》，载《自然科学哲学摘译》1974年第1期。

爱根紧接着提出了另外一种循环。如果一种循环除去所有的中间体是催化剂外,还至少有一个产物也是催化剂,那么这个反应循环就是催化循环(见图15·7)。

图15·7中所有产物 E_1-E_n 都是下一步反应的催化剂,而最后一个产物 E_n 又回过头来催化 E_1 的产生。催化循环的最简单的代表是一个自催化剂或自复制单元: $x + I \rightarrow 2I$ 。生物体内双链DNA的自复制就是一个典型的例子(见图15·8)。从化学动力学性质看,

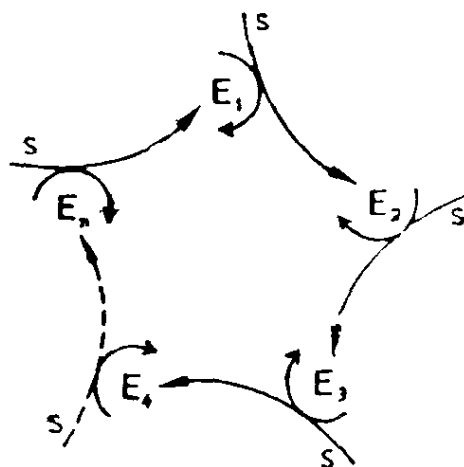


图15·7 催化循环

这种自催化系统(最简单的催化循环)可以看作是二次或较高次的反应,反应速度正比于反应物的浓度和酶的浓度。如果底物浓度不受到缓冲,自催化系统随时间显示指数增长。当然在底物浓度受到缓冲时,它将同反应循环一样呈线性关系。

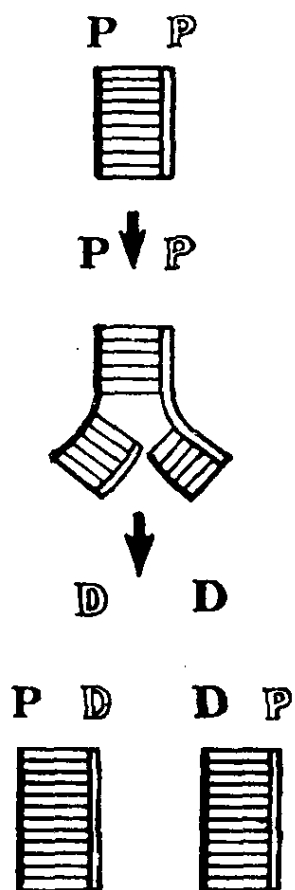


图15·8双链DNA的自复制

最后爱根提出了超循环的概念。超循环是较高等级的循环或者说是由循环组成的循环。按理说一个自催化系统已经可以称为是超循环,因为它代表了本身是反应循环的催化剂的循环。但是艾根所指的超循环是催化功能的超循环,即经过循环联系把自催化或自复制单元连接起来的系统,其中每个自复制单元既能指导自己的复制,又对下一个中间物的产物提供催化帮助,例如图15·9(图见下页)。

爱根认为遗传密码的复制就是用这种

反应起始时的特征。

超循环的数学模型

爱根认为现实的生命形式在它的分子进化阶段，如同达尔文等人提出的生物进化一样，是长期自然选择的结果，其间需要超循环的组织形式。爱根指出从生物大分子的水平来看，选择和进化的分子基础主要是代谢，自复制和变异。代谢是在不平衡系统中进行的合成与分解的循环，自复制才使进化和选择的信息得以积累。突变是指自复制中的错误，它提供了新信息的来源，是进化所必须先决条件，突变有一定的阈值。根据以上的考虑，爱根建立了一组唯象方程作为超循环系统的选择动力学的数学模型。

$$\dot{x}_i = (A_i Q_i - D_i) x_i + \sum_{k \neq i} W_{ik} x_k + \varphi_i \quad (1)$$

其中 x 表示超循环系统中第 i 个自复制单元； i 为流动下标，表示可以区分的自复制单元； $\dot{x}_i$ 表示其变化速率； A_i 表示分子种的自发合成项； Q_i 表示正确复制率，取值在 $(0,1)$ 区间； D_i 表示分解项； $(A_i Q_i - D_i) x_i$ 表示代谢项，相应地 $A_i(1 - Q_i)x_i$ 表示错误复制项； W_{ik} 表示第 k 个自复制单元通过突变而成为 x_i 的回复突变率； $W_{ik} x_k$ 表示回复突变项； φ_i 表示迁移项。

当所有自复制单元存在时，错误复制项有下列恒等关系：

$$\sum_i A_i(1 - Q_i)x_i = \sum_i \sum_{k \neq i} W_{ik} x_k \quad (2)$$

$$\text{迁移项: } \varphi_i = \varphi_i x_i / \sum_k x_k \quad (3)$$

为了提供复制的一般条件，在进化实验中，可以调节整个超循环的总浓度，使之为常数。

$$\sum_k x_k \equiv C_n \quad (4)$$

$$\text{则 } \varphi_i = \sum_k A_k x_k - \sum_k D_k x_k \equiv \sum_k E_k x_k \quad (5)$$

$E_i = A_i - D_i$ ，表示 x_i 的过量产物。

把方程 (1) 和 (2) 结合代入 (5), 就得到一个新方程:

$$\dot{x} = (W_{ii} - \bar{E}(t)) x_i + \sum_{k \neq i} W_{ik} x_k \quad (6)$$

$$W_{ii} = A_i Q_i - D_i \quad (7)$$

W_{ii} 表示内秉选择值

$$\bar{E}(t) = \sum_k E_k x_k / \sum_k x_k \quad (8)$$

$\bar{E}(t)$ 表示该系统的平均过量产物, 是一个不变量。

拟种概念

爱根通过对唯象方程的讨论, 得到了两个颇有启发性的结果, 其一就是拟种概念。

爱根指出拟种是以一定的概率分布组织起来的一些关系比较密切的分子种的组合。在一个生物种中, 个体的基因型可以有差别。在一个群体的野生型中, 各种基因型有一定的频率分布。而拟种概念是同这一事实相似的, 在进化过程中, 选择的对象不是单一的分子种, 而正是拟种。拟种作为选择压力的承担者, 在竞争中或者存在下来成为优势种或被淘汰。

拟种的信息容量

这是艾根通过对上述唯象方程的讨论得出的另一个重要结论。

拟种的最大信息容量 (即最大符号位数 $V_{\max}$) 同主要种每个符号正确复制的平均概率 q 之间有下列关系:

$$V_{\max} = \ln \sigma / (1 - \bar{q})$$

其中 σ 表示主要种的优势参数; $1 - \bar{q}$ 表示主要种每个符号的平均错误复制率。

由此可见, 如果正确复制的概率越大, 那么最大符号位数也就越大。但是, 由于突变存在, 这个符号位数不能无限增加, 它有一定的阈值。自复制单元中的符号 (核苷酸) 数目也不能太小, 以保证复制错误率在某一规定的频率之下。否则, 在进化过

程中所积累起来的信息量就会遗失。爱根曾把达尔文系统中信息存贮的基本阶段列为下表,以示随着生物的进化复制错误率减小,自复制单元RNA或DNA的分子量增加,最大数位容量增加的趋势。

表1 达尔文系统中信息存贮的基本阶段

1 - q̄	σ	Vmax	分子机制和例子
5 × 10 ⁻²	2	14	无酶RNA复制 (未见)
	20	60	
	200	106	tRNA前体 V = 80
5 × 10 ⁻⁴	2	1386	由专一复制酶催化的单链
	20	5991	RNA复制
	200	10597	QB噬菌体 V = 4500
1 × 10 ⁻⁶	2	0.7 × 10 ⁶	经复制催化的DNA复制, 包含外
	20	3.0 × 10 ⁶	切酶的校正
	200	5.3 × 10 ⁶	大肠杆菌 V = 4 × 10 ⁶
1 × 10 ⁻⁹	2	0.7 × 10 ⁹	真核细胞DNA复制和重组
	20	3.0 × 10 ⁹	
	200	5.3 × 10 ⁹	脊椎动物 (人) V = 3 × 10 ⁹

最大信息容量的概念, 实际上给出了一个允许任何特殊机制的潜在进化能力的定量估计。它可以估计出在一定优势参数和特定突变情况下, 一个稳定结构所需的信息容量。

最大信息容量的概念说明: 信息的选择性累加的任何机制都有一个模板中符号数位的上限, 超过这个限制就不能保证拟种的内部稳定性, 所以拟种的内部稳定性, 比起它的“生存竞争”来说, 是达尔文进化行为的更基本的特征。实际上, 生物体内的生化反应总数的所有符号位数, 大大超过目前最精确的复制所允许的最大符号位数。因而艾根认为, 只有经过超循环式的联系, 才能

把自复制和选择上稳定的单元结合为下一步较高的组织形式，以再产生选择上稳定的行为。

超循环的研究方法

爱根建立的超循环的选择动力学的数学模型，包含非线性的微分方程，不易求解。而研究选择和进化也不一定需要完全的解曲线知识。只要判定超循环的可能性，稳定性及最终趋向就行了。因此，爱根以热力学中的重要函数——古布斯函数和化学势概念讨论了超循环的可能性。以李雅普诺夫的稳定理论，不动点分析及结合轨线的数学运算讨论了超循环的稳定性及变化状态。爱根所用的这些研究方法，是有效的。

案例分析

利用上述方法，爱根分析了一些具体的系统。

1. 独立的竞争者系统。

设有三个独立的竞争者，它们满足方程：

$$\dot{x}_i = K_i x_i^p - t_i / C \sum_{j=1}^3 K_j x_j^p \quad (i=1,2,3, K_3 > K_2 > K_1)$$

当 $P = 0$ 时，独立的竞争者将会产生一个在浓度三角形内部的稳定的不动点，它意味着所有种的稳定共存。当 $P = 1$ 时，唯一的稳定不动点在浓度三角形的顶点3上，这时只有一个种是优势种，其它种会被淘汰。原因是虽然每个种都能进行自复制，但是复制速率对环境的适应度不同。当 $P = 2$ 时，有三个稳定不动点，即浓度三角形的三个顶点。浓度三角形分为三个区域，每个区域中的所有点都将趋向一个稳定的不动点，显示出“一旦出现，就永存下去”的选择行为（见下页图15·11）。

2. 催化链结构。

如果系统中的每一个组分都是一个自复制单元，并且又能催化生成下一个确定的组分，这样一个系统叫催化链结构（见下页图15·12）。

催化链结构的最后组分，将最终排它地占统治地位，因此，催化链结构作为一个信息积累系统是没有意义的。

3. 分支系统。

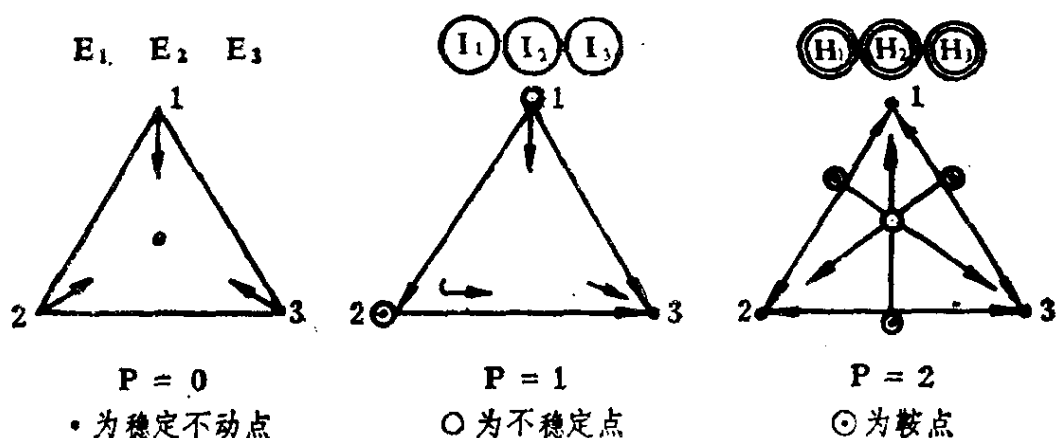


图15.11 不同类型的独立竞争者的不动点图

如果一个自复制组分可以催化两个以上的反应时，此系统为分支系统。分支可以包括一个以上的成员（见图15.13）。在一个充分长的时间里，其中的某一分支将成为优势分支，而其它分支被淘汰。整个分支

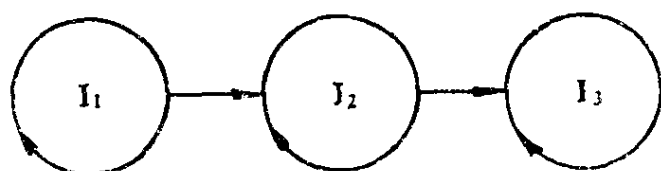


图15.12 催化链结构

系统简化成一个催化链结构不复存在。

4. 超循环结构。

关于超循环的结构，这里不再叙述。在一个动力学系统中，耦合链上的闭合回路常使整个系统出现新的性质，导致选择行为的一个新变化。

爱根研究了几种不同的超循环，如基本超循环、合成超循环、带翻译的超循环，最后

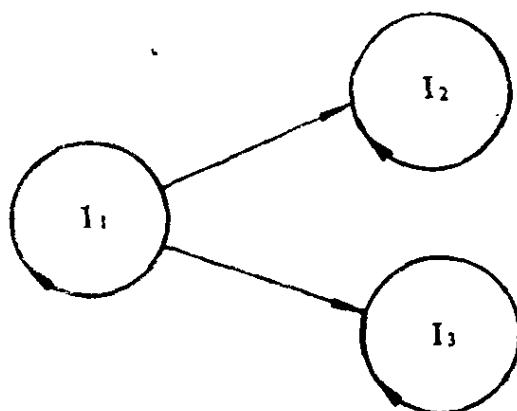


图15.13 分支系统

总结出超循环的一些性质：超循环使得借循环联系起来的所有种稳定共存，允许它们相干地增长，并同不属于此循环的复制单元竞争；超循环可依照选择优势放大或缩小；超循环的选择是“一旦出现，就永存下去”的。由于超循环模型的非线性性质，选择优势是种群量的函数，少量的新的自复制单元不易取代已经建立起来的超循环，因此，超循环是能够积累、保持和处理遗传信息的大分子组织的最低要求。

爱根还对原始的翻译机构，tRNA 的起源，遗传密码的进化等做了详尽的分析。

对爱根的超循环理论，在科学界一直有很大争议，但是它毕竟开辟了探索生命起源这一前沿科学的一个新方向，因此具有重要意义。

第四节 生物控制论、系统 科学与还原论问题

从热力学第二定律引出的关于物理系统与生命系统的关系问题，一直到耗散结构、协同学等理论关于自组织系统的研究，不仅在科学上是一个重大的理论问题，而且在哲学与方法论上也涉及到一场重大的争论，即还原论与反还原论之争。就本书所论述的范围来说，在生物控制论中就已经涉及到这个问题，由于学科的相互渗透，只有在分别论述了有关的理论观点后才能说清楚。

还原论与反还原论是生物学中的一个古老的哲学问题，也是一个方法论问题。可以说，自从有了生物学以来，就开始了这场争论。争论的主要问题是有没有独立的生命形式？还原论者说没有，认为生命的运动形式和规律都可以归结为物理和化学的运动形式和规律，认为人、动物就是一种机器，所以历史上的还原论

又称为机械论。反还原论者说有，认为生命运动完全不同于物理化学的运动，生命还受一种特殊的力量所支配，这种特殊的力量叫做“隐得来希”，或叫做“活力”，因此，反还原论者在历史上又称为“活力论”。

1938年，物理学家、化学家和生物学家曾聚会在法兰西学院讨论过这个问题。在讨论结束时存在着三种截然不同的意见：

（1）我们目前的物理学知识和化学定律不久就会使我们能够解释生命而用不着任何别的特殊的“生命原理”。（2）关于物理学和化学，我们知道得虽多，但自以为知道它们的一切，那就是妄自尊大了。我们希望在现在还没有发现的东西里面，有些新的定律和原理会被发现，使我们能解释生命现象。我们承认生命遵从我们目前已经知道的全部物理学定律，但是我们确实感到还需要一些别的规律才能理解生命，至于这些规律应当称之为“生命原理”，还是给以其它名称，那是无关紧要的。（3）必须援引“生命原理”，才能理解生命。生命机体的行为截然不同于无生命物质的行为。热力学原理，特别是热力学第二定律，只适用于死的、无生命的物体；生命对于热力学第二定律说来是例外，新的生命原理要能解释违反热力学第二定律的情况。

我们以上介绍到的薛定谔、维纳、申农、布里渊、普里高津、哈肯等人都应基本归于持第二类意见的，由此也将发现第二种意见是最有生命力的；第一种意见是自满自足的，它难以深入研究新的物理学定律；第三种意见，把生命与非生命现象截然对立，不无偏颇，也令人难以相信。而第二种意见却诱发了物理学和生物学相互渗透，不断发现新的定律以说明过去难以解释的现象。

第二种意见说到底还是一种还原论思想。但这种还原论同古老的机械还原论相比已有了下述一些显著的区别：

首先，这种还原论向两极发展，一是深入到物质的更深一层

的结构，另一是从整体上综合地考察物质的特性。控制论，系统论从某种意义上讲就是一种整体的还原论。

其次是人们对信息概念的重视。世界由物质、能量和信息三种基本要素组成，生命作为世界的一部分，也由这三种基本要素组成。人们已发现了许多关于物质的质量与能量的规律不仅适用于无机界，而且适用于有机界和生物界。现在问题是，在信息方面，自然界和生命系统是否遵循共同的规律呢？因此产生了许多科学假说和哲学命题。

另外是物理学和生物学的相互渗透。许多科学家把着眼点同时放在物理学对象和生物学对象上，在相同点和不同点中去寻求共同规律。

当然，这些科学家们的一个基本出发点仍是坚信世界是可以归一的。因此，他们不愿放弃热力学第二定律，认为生命系统不违背这一定律，问题是要在这一定律的总的背景下来认识生命现象。这就是非平衡热力学的出发点。

本世纪40年代以来，在新的历史与科学技术的背景下，还原论与反还原论又开始了新的争论，这一争论是由于分子生物学的产生和发展引起的^①。20世纪以来，人们逐渐用物理和化学的方法来研究生物学问题，这些研究使人们感到“生物的结构与功能并没有什么神秘的活力，除了这些生物大分子之间的物理、化学力之外，再也看不到有什么外力支配”^②。于是，还原论就活跃了起来，认为生命规律无非就是这些生物大分子之间的物理化学作用，因此，生物学的规律可以归结为物理化学规律。反还原论者则不同意这种观点，认为生物大分子只是组成生物体的基本元素，而整体并不等于它的所有部分的机械相加，所以生物体的生

①② 胡文耕：《分子生物学中的哲学问题》，载《自然科学哲学问题论丛》，广西人民出版社1981年版，第230页。

命现象是生物体作为一个整体时才具备的，而不是生物大分子所具备的。可见，新出现的还原论与反还原论又涉及到整体与部分究竟是什么关系这样一个问题。

控制论在生物学中的应用所引起的哲学讨论，正是在这样一种情况下加入到还原论与反还原论之争的行列中来，并促进了这一争论的发展。

在50年代中，还原论与反还原论对控制论在生物学中的应用的讨论是以机械论和反机械论的形式表现出来的。

有的哲学家认为把控制论应用于生物学、把生物体与自动机进行比较是一种机械主义的方法，是拉美特利的“人是机器”的机械论观点的继续。

但也有很多科学家和哲学家反对这种观点，认为控制论在生物学中的应用实质上是要使生物学定量化，这种比较是一种量的比较，这种量的研究只有把它绝对化时，才会为机械主义制造条件。事实上，对任何一门科学进行数量化的研究是完全合理的，没有理由把它看作是机械主义。因此，控制论在生物学中的应用标志着数学物理的方法进一步渗入到了生物学，是生物学的一次重大变革。

由于在这个时期还原论与反还原论争论中所涉及的一个重要问题是整体与部分的关系问题，因此，当时这种机械论与反机械论的争论又围绕着自动机和生命体的这种比较是整体性的观点，还是机械主义的观点展开了讨论。

有许多科学家、哲学家认为，把控制论的自动机和生物有机体相比较的最根本的意义在于，控制论所持的整体性观点与生命现象的特点是相吻合的。这种整体性的观点正如控制论的创始人之一艾什比在《控制论在生物学和社会学中的应用》一文中所指出的：“控制论所研究的是各种因果联系……，但所考察的不是一个原因同一个动作的关系，而是整个原因群同由这些原因产生

的相应的动作群之间的关系。”^①

就在控制论的这种整体性思想日益为生物学界所重视的同时，奥地利生物学家贝塔朗菲在本世纪30年代直接从生物学研究中提出的一般系统思想也是强调整体性的，但许多控制论的拥护者却反对贝塔朗菲的理论，其原因是因为控制论的整体性思想与贝塔朗菲的整体性思想是存在着一些区别的。控制论的奠基者维纳认为，在机械行为与生命体行为的比较中，至今尚未发现有不同的性质使它们不能够进行比较。而贝塔朗菲却认为，生物的调节过程比机械的调节过程具有更高的质，因此二者是不能比较的。由此，有些人认为虽然维纳持有整体性观点，但他还是一个机械主义者。

曾经获得过诺贝尔奖金的法国著名生物学家莫诺也指出，维纳的控制论和贝塔朗菲的一般系统理论在整体性问题上有着本质的区别，但他赞赏前者，反对后者。他把具有整体性特征的目的性这一概念直接还原到蛋白质分子上，他分析了同分异构蛋白质的调节过程，并称这种调节是微观控制论，认为它是“理解控制论系统在生物中的起源和发展的必不可少的钥匙”。^②莫诺认为只有在深入到生物体的微观基础上进行分析，才可能在真正意义上理解生物体实际上是怎样在服从物理化学定律的同时又超越了这些物理化学定律的。而他认为贝塔朗菲的一般系统论则是含混不清的，内容贫乏的^③。因为它只是空泛地对生物体做一个整体性的描述，而没有对内部具体细节的了解。

从莫诺的上述观点来看，他的方法已经不是简单的还原论的方法。还原论只是指那种盲目地使用物理化学的分析方法，对生

① 艾什比：《控制论在生物学和社会学中的应用》，载《控制论哲学问题论文集》，商务印书馆1965年版，第76页。

② 莫诺：《偶然性与必然性》，上海人民出版社版，第52页。

③ 看参J·卡马里：《有机界中的含目的性的辩证法问题》，载《自然辩证法研究通讯》，1964年第2期，第25页。

物体层层分析下去，忘记了在分析之后还要再进行综合，以为生物体仅仅服从物理化学规律，而莫诺却强调了生物对物理化学定律的超越。

但也有一些人正是基于控制论不是一般的物理化学规律，它的特点在于整体性的调节控制这样一个观点，所以他们把生物体比做一架控制论式的自动机，来解释生命的不可还原的结构，来证明物理化学方法不能适用于生物学。

埃尔萨赛曾经作过这样的论证，他认为生物有机体就好像一架具有许多相互连接的反馈回路的反馈自动装置，在其中有无数多的反馈耦合在一起，以致无法对它的活动进行测度。因为仪器所造成的影响必然会通过反馈迅速扩散到生命有机体的全体，以致使它的面目全非，因此，生命现象是不能依据对单个物体的测量来加以研究的，只能依据它的特性从理论上去掌握。埃尔萨赛与莫诺相反，对贝塔朗菲的直接观察和描述生命有机体的特性作法十分欣赏。

著名的反还原论者波拉尼提出了边界条件说，来反对那种企图把生物体还原为物理化学定律以后再进行整合的作法。他认为机器与生物体是指一架作为整体的机器的运转受着两种不同规律的支配，较高的规律虽然利用了物理化学这样一些较低级的原理，但它本身并不是物理化学原理。在他看来，有机体一旦成其为有机体就已经产生了边界条件，这些边界条件根本独立于它们所根据的物理化学规律所起的作用，而超越于物理化学规律之上，对于生物体的这样一种特点，用物理化学的分析方法是行不通的，因为用分析的方法还原下去以后，必须再整合才能认识生物体的全貌，而这种整合是超出了人的认识能力的^①。所以从这

① 参看M·波拉尼：《生命不能还原的结构》，载《摘译——外国自然科学哲学》，1975年第2期，第104—116页。

里也可以看出，他是不同意莫诺的观点的。莫诺认为必须把生物体分析，还原到低层次以后再加以整合才能真正认识生物体，否则认识到的整体就是一个空洞的抽象，而波拉尼认为这种整合超出了人的认识能力，是不可能成功的。因此他反对还原的方法。

从以上这些人的观点可以看出，即使持整体性观点的人之间也存在着还原与反还原的分歧，也就是存在着维纳与贝塔朗菲式的区别，但是我们也能看出，此时的还原思想已不同于以前的还原论，它是一种整体性观点与分析方法的结合，特别是在莫诺的观点中比较具有这种特点。而那种受反还原论者推崇的贝塔朗菲的一般系统理论也在努力克服自己的抽象性，贫乏性，而使自己尽量精确、丰富起来。这样自从60年代以来，二者出现了互相影响的趋势。这种趋势表现为在用还原的方法，分析的方法作为建立整体的理论知识的手段时，这种手段是经常要由它为之服务的目的来加以校正的，也就是说，它要经常根据整体性的目的来明确还原的方向，而对整体性则需要对它进行更精确更具体的研究，使它落实于组成它的元素之间的相互协调的运动之中，而不能只限于空洞的整体的描述，这种趋向无疑是有效地利用还原方法，在整体的认识中弥补还原方法的局限性的一个重要条件，同时也是达到一个具体的、丰富的整体性认识的重要条件。

1972年，在意大利召开了一个以“生物学的还原论”为主体的会议。会后，F. J. 阿耶拉等人将这次会议中哲学家和生物学家发表的论文编成一本名为《生物学哲学研究，还原和有关问题》的文集。在这部文集的序言中，阿耶拉总结了历史上的还原论问题，指出历史上一共有三种还原论的表现形式：（1）本体论的还原论，即物理化学的实体和过程是否是所有生命现象的基础，还是存在着某种非物质的“隐得来希”活力。（2）方法论的还原论，即在研究生命现象时，是否应该通过研究复杂程度较低的，如分子和原子的基本过程来解释复杂程度较高的生命现

象，还是必须从研究有机体本身来解释生命现象。（3）认识论的还原论，即一个水平上的理论（如生物学的理论）是否是另一个水平上的理论（如物理学、化学理论）的特殊情况，还是有独立于物理化学规律之外的生命规律^①。

从当前的还原论与反还原论争论的内容来看，第一种形式似乎已经没有人要否认了，争论之点主要是偏重于后两种还原论的形式。这也是60年代以来，还原论与反还原论另一个发展的趋势，因此60年代以来还原论与反还原论的相互影响的趋势主要表现在方法论和认识论的方面。

我们可以把以前的还原论称为机械的还原论，它的主要特点是把生物体的高层次的整体性结构及其规律归结为低层次的要素及其物理化学规律，而现在的“还原论”，实际上是一种“辩证的还原方法”，这种方法认为对生物系统的复杂性解释并不是把生命的规律粗糙地归结为物理化学水平，而是一方面探索它的分子基础，另一方面用进化的、综合的观点来探索生命系统本身的特性。

应该指出，在机械还原论向辩证的还原方法转化的过程中，控制论的方法起了很大的促进作用。这种作用首先表现在控制论把两个极端联系了起来，一极是用物理化学的分析方法不断向生物体的更深层次的结构前进，一极是用整体性的观点去指导这种分析使其不致失去方向，陷于盲目，并且这种联合也有可能使我们能够深入分析生物体的内部结构又使它保持着活体的生命现象，就象系统辨识方法应用于生物有机体时一样。所以，我们不妨可以把辩证的还原方法又称为“具体的整体性方法”。

其次，控制论应用于生物学虽然还没有完全消除神秘的活力

^① 参看M.鲁思：评《生物学哲学研究，还原和有关问题》，载《自然科学哲学问题丛刊》，1979年第1期。

论，从而达到完全解释生命现象的程度，但在某种程度上还是比较较好地解释了生物体的一些目的性行为以及生命的自主性、能动性特点，它和分子生物学以及正在蓬勃发展的理论生物学一起为消除活力论作出了积极的贡献。

控制论在生物学中的应用所带来的关于还原论之争的一些变化，并不就意味着还原论与反还原论这一古老争论的解决，这一问题的最终解决，还有待于科学和哲学的进一步发展。

苏联的 A.K.阿斯塔费耶夫把以前的还原论称为机械还原论，其主要特点是把生物体的高层次的整体结构的规律性归结为结构的组成部分、低层次的要素的规律性，而现在的还原论实际上是一种辩证的还原方法，这种方法认为，生物系统复杂性的因果解释不是经过把生命的规律粗糙地归结为物理化学水平的途径，而是一方面探索它的分子基础，另一方面，用进化的、历史的观点探索生命系统本身的特性^①。

当然，自满自足的意见总是什么时候都有的。随着物理学定律内容的不断增加，又有人认为用现有的物理学规律足以建立一个理解生命现象的理论体系，用以阐明生命的起源和进化，并从而去理解许多其他与生命有关的信息系统，诸如人、精神、社会和文化发展等。美国爱丽莫大学物理教授冯平观就持这种观点，并且整理出了一个这样的理论纲要^②。他认为统计物理的涨落理论提供了信息产生的基本定律，热力学第二定律提供了信息耗散定律，我们可以从这些基本定律合乎逻辑地推导出一系列次级原理，从而完备地说明生命、精神、智能、政治组织、社会结构、

① 参看阿斯塔费耶夫：《还原论和科学方法论》，载《自然科学哲学问题》，1981年第2期。

② 参看冯平观：《生命的热力学和统计理论纲要》，载《自然科学哲学问题》，1980年第2期。

法律伦理等等系统。但从我们以上所追溯的历史发展阶段来看，问题远远没有这样简单，要跨越物理现象和生命以及社会现象之间的鸿沟，还需经历一个长时间的努力。这当中会出现形形色色的自然科学和哲学问题，对一些古老的问题也会出现不同的见解。

第十六章 系统研究、系统科学的哲学与方法论问题

第一节 系统思想的发展

关于系统和系统科学的研究虽然蓬勃发展于今天，但就其思想渊源来说，却源远流长。可以说，整个人类思想文明发展史都为它提供了丰富的思想资料。人类对客观事物的认识，最初总是习惯于从事物的总体方面来观察。当人类文明发展到一定程度，人类就不得不用分析的方法代替综合的方法，侧重于分析事物的各个部分，然后再把对事物各个部分的认识相加起来作为对整个事物的认识。随着科学技术的发展，前两种认识方法都不能满足人类认识和改造世界的需要，人类的认识方式发展到了新的阶段，即从事物的内部有机联系，从一事物同另一事物的外部关系，辩证地系统地来看待客观世界，这是人类认识的辩证思维阶段。这就是人类认识发展至今为止的几个大的历史阶段。今天，科学技术突飞猛进地发展，人类对世界的认识在定性分析（当然也有一定的定量化研究）的基础上，开始出现既要进行定性分析，又要作科学的精确定量分析的新的发展阶段。这是人类认识发展的一个值得注意的趋势。系统思想的发展与这个历程是相关的。下面就系统思想发展的几个阶段作一些简略的论述。

朴素的整体思想

最早的系统思想来源于古代人类的社会实践经验。人类要从事各项社会活动，就要在实践中同各种对象打交道，于是逐渐

积累了认识系统、处理系统问题的经验，这样就产生了朴素的整体思想，这是人类系统思想发展的早期阶段，这个阶段是一个漫长的时期，从古巴比伦时代一直到17世纪近代科学思想的崛起。

人们在社会活动中遇到的一个重大问题，就是如何看待自己生活的客观环境。很久以前，巴比伦人就开始运用整体的思想来观察宇宙了，他们把宇宙作为一个整体，认为宇宙是一个密封的箱子或小室，大地是它的底板；底板中央耸立着冰雪覆盖的区域，幼发拉底河发源于这些区域中间；大地周围有水环绕，水之外有大山，以支持蔚蓝色的天穹^①。巴比伦人把宇宙描述成一个分层次、有结构的整体。古埃及人同古巴比伦人一样，也把宇宙看成一个总体，只不过具体描述方式不同。他们认为宇宙是一个方盒，南北较长，底面略呈凹形，埃及就处于凹形的中心。天是一块平坦的或穹窿形的天花板，四方有天柱，即天峰所支撑，星星是用锁链悬挂在空中的灯。在方盒边上，围着一条大河，河上有一只船载着太阳来往，尼罗河是这条大河的支流。这是最朴素的系统描述的思想。人们在长时期的农业生产实践活动中，逐步把农业生产的诸因素作为一个整体来看待。我国是系统地认识农业较早的国家，《管子·地员》篇、《诗经·七月》等著作，对农作物与种子、地形、土壤、水份、肥料、季节诸元素的关系，都有较为辩证的叙述。人们在军事活动中，对军事系统诸因素的关系也逐渐积累了整体性的认识，我国《孙子兵法·计》篇从天时、地利、将帅、法制和政治等各个方面对战争进行了系统的分析。在古代工程实践中，人们早就注意到了系统问题。前文已指出，秦朝四川郡守李冰父子主持的成都都江堰工程从设计到施工、竣工都体现了系统工程的基本思想。我国明朝永乐年间，铸造了一个40多吨的大钟，但当时最大的炼炉才高1.2丈，容量2000多

① 参看W.C.丹皮尔：《科学史》，商务印书馆1979年版，第33页。

斤，怎么能铸成40多吨重的铜钟呢？古人就采取了“系统工程”的方法，在铸件周围建造了数十个总容量同铸件重量相等的炼炉，各炉同时点火，炼成铜水一齐流向铸型。“群炉江流”铸成“万钧铜钟”。中国古代用系统的办法处理问题的实例很多，这就是其中一例。在医疗活动中，中国医学很早就注重从人体的整体结构来诊断、治疗疾病。战国时名医扁鹊主张按病人气色、声音、形貌的综合症状进行诊断，用砭法、针灸、按摩、熨贴等多种疗法进行综合治疗；《黄帝内经》强调人体内部各系统的有机联系。中医认为人体是一个有机的整体，要从整体上观察病人，强调对病症的综合诊断，中医理论根据阴阳五行学说，把身体和疾病看作是一个总体的动态变化过程。这些事例充分说明早在古代，人们在从事军事系统、农事系统、水利土建工程系统、医学系统、天文系统的研究等项活动中，积累了认识系统的丰富经验。古代经验科学十分重视事物的整体联系，很早就总结了朴素的整体思想。古希腊医学创始人希波克拉认为，疾病存在于全身，即便在身体很小部分引起的损害，全身各部都共同感到这种痛苦，其所以如此，是因为在身体最大部分所存在的也同样存在于最小部分，最小部分具有一切部分，而这些部分是互相关联的，把一切变化传播到所有部分。这是经验科学的整体思想的一个精辟概括。

在对系统的经验认识基础上，逐渐形成了对系统的哲学认识。朴素的整体思想在古希腊哲学和中国古代哲学中以朴素辩证法的形式表现出来。米利都学派的泰勒斯把宇宙看成一个自我循环的自然总体，认为宇宙是一个自然体，处于从空气、土、水，经过动植物的身体，然后再复归到空气、土、水的循环变化过程中，把宇宙描写成一个循环变化的自然总体。泰勒斯还注意到植物的食物都带湿气，因而提出水是万物的基质，用水这个基质来统一自然万物。毕达哥拉斯认为整个天是一个和谐，是一个数

目^①。把天说成数目，显然是荒谬的，但他把天看作为和谐的整体，却是合理的。他还第一次把人作为一个整体同宇宙整体比较，认为人是小宇宙，是大宇宙的缩影；人体是世界总体的反映，这种对比无疑是有合理因素的。紧接着，留基伯——德谟克利特——伊壁鸠鲁的原子说，试图从世界统一性、整体性、一体性的角度来解决世界本源问题。原子论对后来系统思想发展至少在下面两点上是有影响的，一是它把原子看成是一个没有部分的整体；二是它把宇宙分成若干层次，将原子作为构成宇宙的最基本的要素。赫拉克利特在《论自然界》一书中说：“世界是包括一切的整体”。德谟克利特有一本没有留传下来的名为《宇宙大系统》的著作，把宇宙作为一个系统来看，可能是最早引用“系统”一词的书。亚里士多德是欧洲思想史上第一个把许多门科学系统化的学者。他提出了整体大于各部分总和的著名论断。他提出了运动的四种形式：（1）事物产生到灭亡的本质变化；（2）事物从一种状态到另一种状态的性质变化；（3）事物增加或减少的数量变化；（4）事物的整体转移的位置变化。“事物的整体转移”显然是对系统的变化过程、整体运动的过程的一个合理的猜测。贝塔朗菲认为：“亚里士多德的世界观和目的论的观点就是这种宇宙程序的一种表达方式。亚里士多德的论点，‘整体大于它的各部分的总和’是基本的系统问题的一种表达。”^②亚里士多德是人类历史上较早地从哲学上来论述系统思想的哲学家。可以说，这是古代系统思想的最高哲学概括。在我国古代哲学中，关于系统问题的哲学论述也不胜枚举。我国春秋战国时期的许多思想家都强调自然界的统一，《易经》就试图用阴阳五行八卦论来

① 参看W·C·丹皮尔：《科学史》，商务印书馆1979年版，第37页。

② 贝塔朗菲：《普遍系统论的历史和现状》，转引自《科学学译文集》，科学出版社1981年版，第305页。

说明统一的世界。《易经》以人们在自然界中经验能够感觉到的人和自然物，作为世界的万物之源，它们是天、地、雷、火、风、泽、水、山。天地是父母，产生雷、火、风、泽、水、山六个子女。《易经》认为，金、木、水、火、土是构成世界万物的基本因素。五行八卦构成了自然系统，这是我国古代朴素的系统观点。老子则企图以“道”来统一万事万物，他说：“道生一，一生二，二生三，三生万物。”^①总而言之，原始的系统思想，或叫朴素的整体思想是简陋的、朴素的，然而却包含了正确的整体观因素。

机械的整体性思想

15世纪以来，形而上学的分门别类的研究事物的方法，开始取代古代朴素的系统地、整体地观察事物的方法。这种思维方式最初是由16世纪的弗兰西斯·培根发展起来的，他使用归纳法，认为必须对一切可以获得的事实进行纪录，然后再将这些纪录的材料按一定的规则排列出来，编成表格。这种最初出现在科学上的思维方法，后来被17世纪初的哲学家霍布斯从哲学高度加以概括，使其带有理论的性质，他把培根的理论系统化，极端化，用力学和几何学的原理来解释物质及其运动，认为物质运动纯粹是机械运动，是靠外力推动的。他认为把“物体——活的——理性”三个东西加到一起就是人。霍布斯建立了一种与整体思想本意相违背的机械性的整体思想。牛顿又把这种思想发展到顶峰，并贯串到力学和物理学当中。

从根本上说，机械的整体观是反辩证法的，它的整体观是简单的部分相加为整体的思想，同系统的整体观在本质上是不同的，但我们仍然把这种思维方式作为系统理论发展的一个阶段。理由是：（1）这种思维方式被发展为哲学上的机械论，作为一

^① 《老子》第四十二章。

种普遍的、唯一的思想方法是错误的，但这种思想方法要求分门别类的考察事物，了解或弄清事物的内部结构以及各部分的性质，这对发展科学仍不失为有效的认识方法。人们对客观事物的认识必须既从整体上入手，又要认真考虑部分，机械观思想的错误在于没有正确对待事物的整体和部分的关系。然而，就重视部分这一点来说，对于正确解决整体和部分的关系仍有一定的意义。（2）这种思维方式虽然过分地强调“分析”方面，但它并不是完全否认事物各部分之间是有联系的，只不过这种联系是一种机械的、静态的整体联系，而不是后来系统科学所强调的有机的、动态的联系；它不承认“整体大于部分之和”的原理，而坚持“整体等于部分之和”的原理。我们正是在这个意义上把它称之为“机械的整体观”。如，笛卡尔就把人体比喻为一架机器，拉美特利则在《人是机器》一书中，将人、动物、大自然比喻为一架机器，用机器的原理解释它们的整体运动。（3）这种思维方式试图从机械论的角度认识自然，力图把自然描绘成机械性的系统。牛顿就是以经验归纳的方法建立起自己的自然哲学体系的。他认为，自然哲学的目的在于发现自然界的结构和作用，并且尽可能地把它们归结为一些普遍的法则和一般的定律。稍后一些，法国人霍尔巴赫企图从整体性出发建立自然体系，他认为，自然是指不同的物质，不同的配合，以及我们在宇宙中看到的不同运动组合而产生的一个大的整体。但是他们充其量不过是形而上学的机械整体观。（4）当时，虽然形而上学的思维方式占有统治地位，然而，可喜的是仍有许多辩证的整体思想的闪光。有三个人思想值得我们重视。一个是17世纪斯宾诺莎的“实体”思想。他认为世界是一个自然实体，它按照自己的规律运动，实体内部是错综复杂的，无穷无尽的因果联系，自然实体存在和变化的原因在于实体本身。这是朴素整体观的发挥。再一个是狄德罗的思想，他认为，一切都在变，一切都在过渡，只有整

体不变，世界生灭不已，每一刹那它都在生都在灭，从来没有例外，也永远不会有例外。整体处于动态变化中的这个思想也是可贵的。最后值得一提的是莱布尼茨的思想，他的单子论对我们研究系统思想史有重要意义，我们暂且避开他在单子论问题上的唯心主义立场，只讨论其关于单子本身的见解。他认为单子不是僵死的，是能动的实体，一切事物都是单子的表现，单子的彼此不同，构成了千差万别的事物，单子的高低不同形成一个连续的系列，表现为事物由低级向高级过渡，单子之间的普遍联系构成了整体的世界。他强调单子的整体性，不可分性和独立性，强调单子的结构层次性，系列发展的动态性，单子之间的相互联系性。这些都对后来的系统思想发展提供了有价值的思想资料。莱布尼茨在《单子论》中认为：“宇宙是一个被规范在一种完美秩序中的统一体系。”贝塔朗菲赞扬说：“莱布尼茨的单子等级与现代等级很相似。”^①莱布尼茨的单子论体现了较为完整的系统观点，对近代系统论的形成有很大的影响。由此看来，机械的整体观阶段是人类系统思想发展的一个必经阶段。但是我们必须看到机械的整体观有着不可克服的局限性。列宁说：“第一个局限性是：旧唯物主义者的观点是‘机械的’，这就是说，他们‘仅仅运用力学的尺度来衡量化学过程和有机过程’。……第二个局限性是：旧唯物主义者的观点是形而上学的，这就是说，‘他们的哲学是反辩证法的’。”^②列宁在此虽然是批判旧唯物主义，但同样适用于机械的整体观。

辩证的系统思想

17世纪上半期以来，自然科学成就使辩证的系统观最终确立。恩格斯指出，由于自然科学的巨大进步，“我们现在不仅能

① 《科学学译文集》，科学出版社1980年版，第306页。

② 《列宁选集》第2卷，第245—246页。

够指出自然界中各个领域内的过程之间的联系，而且总的说来也能指出各个领域之间的联系了，这样，我们就能够依靠经验自然科学本身所提供的事实，以近乎系统的形式描绘出一幅自然界联系的清晰图画。”^① 17世纪自然科学“本质上是**整理材料的科学**，关于过程、关于这些事物的发生和发展以及关于把这些自然过程结合为一个伟大整体的联系的科学。”^② 19世纪自然科学的发展引起了人们认识的根本转变。达尔文的生物进化论为生物有机论提供了一个科学的理论基础；辩证的系统思想的确立同达尔文的进化论有着最直接的渊源关系。进化论认为生物是一个变化的系统，是在外界自然条件的影响、选择下，相应地改变本身的内部结构的系统。这个思想同现代系统科学中的开系统理论是一致的。达尔文的有机进化思想冲击了机械的整体观，是辩证的整体思维方式的先声。

在自然科学发展的基础上，黑格尔第一次把整个自然的、历史的、精神的世界描写成一个过程，这是自然科学中的系统思想在哲学上的一种反映和概括。黑格尔认为任何一个事物都有发展的过程，事物发展变化的原因在于其内部矛盾的相互作用，是一个从量变到质变的动态过程，黑格尔的概念体系就是一个系统的体系。在黑格尔之前，康德提出的“物自体”的思想也对系统思想的形成起到了一定的影响，“物自体说”否认“整体等于部分之和”命题，并且猜测到“整体大于部分之和”，在他看来，“物自体”是不能用现象总体说明的，物自体是现象总体的本质，然而现象总体却不能包括物自体。

19世纪中叶，马克思关于辩证唯物主义的物质世界整体联系的思想，是对辩证系统观的高度的哲学概括。首先，马克思、

① 《马克思恩格斯选集》第4卷，第241—242页。

② 同上，第241页。

恩格斯在自己的著作中，多次从哲学的高度明确使用系统概念和系统思想。如“系统”、“有机系统”、“总体”、“整体”、“过程的集合体”等概念。恩格斯指出：宇宙是个体系，是各种物体相互联系的总体。我们面对着整个自然界形成一个体系，即各种物体相互联系的总体。“思维的本质都在于把事物综合为一个统一体”^①。其次，唯物辩证法一个重要思想就是系统性整体性、联系的思想。恩格斯说：辩证法“以近乎系统的形式描绘出一幅自然界联系的清晰图画”^②。斯大林指出：“辩证法把自然界看作有联系的统一整体，其中各个对象或现象相互有机联系着，相互依附着，相互制约着”^③。马克思主义经典作家们已经从辩证唯物主义的高度概括总结了系统思想。再有，马克思在社会历史观方面成功地运用了辩证的系统思想，把社会看作为一定经济形态的社会有机系统，认为社会“就是一切同时存在而又互相依存的社会机体”^④，“每一个社会中的生产关系都形成一个统一的整体”^⑤。他运用系统性的思维方式来具体地分析资本主义社会，从而揭示了资本主义必亡的客观规律。马克思的社会系统论是辩证的系统思想在社会科学领域内的运用。

以上说明，系统思想早已被马克思主义经典作家从辩证唯物主义的哲学高度阐述过。一般系统论的创始人贝塔朗菲也认识到马克思在现代系统论形成中的重要作用。我们认为辩证唯物主义把系统思想纳入了自己的哲学体系，对人类系统思想作了正确的哲学概括。

定量分析的科学系统思想

19世纪末期以来，自然科学、社会科学的发展推动了系统思

① 《马克思恩格斯选集》第3卷，第80页。

② 《马克思恩格斯选集》第4卷，第242页。

③ 《斯大林选集》下册，第425—426页。

④⑤ 《马克思恩格斯全集》第4卷，第144—145页。

想由定性的哲学理论概括发展到定量的具有广泛意义的科学思维方式。19世纪末,20世纪初,自然科学发生了一系列革命,这场革命是由于电子的发现而开始的,人们对物质世界的认识由分子水平进入原子水平,又进入电子水平,并开始进入基本粒子水平。爱因斯坦1905年提出了狭义相对论,1924—1926年间量子力学确立。50年代,生物学领域有了重大突破,分子生物学建立了,60年代开始了量子生物学的研究。相对论的建立和物理学的发展直接推动了天文学的发展和航天科学技术的发展,现在人们已经认识了100亿光年范围的宇宙。这几个主要学科的突破,引起了数学、物理学、化学、神经生理学、心理学的新突破和发展,尤其是1912年创立的格式塔心理学对后来系统理论的发展起到了直接的推动作用。40到50年代又出现了控制论、信息论、系统工程、计算机科学技术等新兴学科的蓬勃发展,社会科学出现了定量化的发展趋势,整个科学和工业的发展为系统研究的定量化,提供了坚实的科学技术基础。

同时,近20年来,科学技术的发展提供给人们的认识对象不断复杂化,推动着人们不断地去探索认识复杂事物的方法。现代科学技术的发展,使人们经常会遇到大范围、高参量和超微、超宏范围的问题,人们的认识对象不仅仅是自然科学领域,而且越来越走向更广泛的社会、经济、政治、军事、文化生活领域。所有这些向人们提供了越来越大,越来越复杂,越来越具有不确定因素的问题,这就更加迫切地要求系统思想由哲学的概括进一步发展为定量化的科学方法。

适应这个需要,贝塔朗菲从20年代开始到1932年间,逐步提出了一般系统论的思想。他针对生物学卷入的机械论与机体论的争论,总结和概括了生物学的机体论,阐述了系统的科学原则,认为,把孤立的各组成部分简单相加不能说明高级水平的性质和方式。如果了解部分之间的关系,那么高级水平的活动就可

以推导出来。这就为系统思想的定性分析转入定量分析指出了一条道路。如前所述，在这前后，许多人在不同的研究领域都提出类似的思想。在这个基础上，贝塔朗菲在1937年正式提出了一般系统论及其原则，并认为它属于逻辑和数学的领域，它的任务是确立适用于各种系统的一般原则。

但是几十年来，一般系统论仍停留在定性的和用哲学语言抽象阐述的阶段，其系统分析的定量化远未实现。定量化的系统分析的确立，首先归功于二次大战时期发展起来的系统工程学，运筹学和控制论、信息论等新兴学科，尤其是60、70年代以来耗散结构、协同学等理论的出现和发展，使系统的定量化研究逐步发展与完善起来，系统科学的体系正在逐步形成。

到此为止，我们简略地回顾了系统思想的发展史。系统思想的发展至今已经历了朴素的整体思想，机械的整体思想，辩证的系统思想，定量化的系统思想四个阶段。实际上是三大过程，即系统思想的经验科学概括阶段（朴素的整体思想的前期）；哲学的概括阶段（朴素的整体思想的后半期及机械的整体思想阶段，辩证的系统思想阶段）；定量化的系统科学思想阶段。人类对客观世界的认识由经验的整体估价，进入哲学的定性分析，最后转入科学的定量分析，这是人类认识的必然发展过程。

马克思主义经典作家认为，每一时代的理论思维都是历史的产物，系统科学的精髓，定量的系统科学方法也是现代生产技术科学水平发展的必然结果。现代科学的发展有两个重要的趋势，即分化和一体化的趋势。一方面科学迅速的分化，许多新的分支越来越多，学科越分越细。另一方面，边缘科学、横断科学、综合科学却又不断出现，许多极不相同的学科在深入一步的层次上携起手来，相互渗透。因而，整个科学的知识结构呈现出深入分化和一体化的趋势。第二是复杂化和数量简约化，科学知识的内容越来越复杂，其认识水平越来越超出人们日常经验所能体会到

的程度。然而，另一方面许多复杂的问题，却被出乎意料地简化为某些数学的或物理的模型，被清楚明白地加以数量的描述与处理，因而科学又呈现出高度概括性和高度的科学抽象性的趋势。这种科学发展的规律从根本上促动了科学思维的方式，促进了量化的系统性思维方式的出现。其具体表现为：

（1）人们科学观察的眼光由“实物中心”转向“系统中心”。古代的经验科学的认识对象只是人们可以直接观察到的。近代科学的认识对象可以通过仪器间接观察到。那时人们所认识的是具体的实物及其结构。而现代科学的认识对象往往是人们借助仪器也不能观察到，但它又确实存在，现在人们对一切客观现象不仅仅是就它本身的实有认识，而且作为一个系统，作为某个更大系统的部分、因素和组成来认识，从对事物的存在和构成的认识，转向对事物的发生、过程、功能、关系的认识。为了更精确地认识事物，人们在理论上可以把任何科学研究对象都看作特定的系统，建立系统仿真的数学模型和物理模型，不仅进行定性的分析，还要进行定量的分析，对事物进行系统性的定量分析是现代科学最重要的任务之一。

（2）科学一体化的发展趋势，打破了学科之间的界限，人们越来越多地看到了不同学科之间，不同科学认识对象之间存在着共同的规律。数学的发展使许多极不相同的学科用极为相似的数学模型来描述，也就是说，抛开各种具体事物的具体特征，集中研究事物之间的某些共同关系，这样就产生了研究共同规律的学科和概念，就可以用数量来描绘事物。定量的系统分析就是概括不同事物的共同规律，找出一般的数学模型来。

（3）人们不仅以解剖学的眼光来看待各个局部、科学的各个分支，而且越来越注重事物的整体，整体内部的关系。科学知识的整体化使人们的科学知识走向新的综合。尤其是近20年以来，经济、军事、农业、政治等等大系统的科学化、定量化和综合化的研

究,使人们对事物的分析角度变了,从整体的角度,从联合的角度分析问题,进行综合分析和比较分析。人们的思维方法越来越具有整体性思维和最优化思维的特点。这具有重大的方法论意义。

第二节 系统科学中的哲学 与方法论问题

系统科学中的哲学问题,已引起了国内外学术界的广泛注意。在此,仅就其中的某些问题加以概述,并提出一些不成熟的看法。

系统概念的哲学意义

在系统科学中,首要的概念是系统概念。这一概念本来是关于系统研究的基础概念,但随着系统科学的出现,随着系统科学的深入和应用范围的扩大,也就逐渐开始探讨这个术语的哲学和方法论的意义。

系统概念最一般、最普遍的意义是哲学上的本体论的意义。在这方面它是就世界的客观系统性而言的。前已提到,贝塔朗菲就曾经指出,系统是处于一定相互联系中的、与环境发生关系的各组成部分的总体。钱学森曾经指出,系统是无处不在的这一基本思想很早就已被恩格斯提出过。恩格斯认为世界不是一成不变的事物的集合体,而是过程的集合体。钱学森指出,恩格斯所讲的集合体就是系统,过程就是系统论中各个组成部分的相互作用和整体的发展变化。

这些论述都是从客观世界本身所具有的系统特性出发来说明系统概念的,因此,可以说是从哲学的本体论意义上来分析系统概念的,或者说,以此来给出系统的定义的。

与此相联系，自然就要涉及到系统在客观世界中是不是普遍存在，即系统是否具有普遍性的问题。

大多数学者都认为从哲学角度看，系统是普遍存在的，因为马克思主义认为事物是普遍联系的，在这个普遍联系之中，世界构成一个有机的整体，这种普遍的联系，这种有机的整体就说明了系统的普遍性，有些学者认为系统本身就是物质存在的一种方式。系统与物质不可分，由此说明系统是普遍存在的。

但也有些学者认为系统并非普遍存在，茹柯夫就认为：系统仅存在于具有目的性的客体中。认为所有现实的客体都是系统是不对的，没有突出系统概念的特点，使之与“客体等同”了^①。

可见，在这方面是有不同看法的，这个问题实际上涉及到系统概念是否只是一个专门的科学概念，是否还可以把它作为一个哲学范畴来看的问题。就目前国内哲学界的意见来看，一般是持后一种观点的，当然这种观点并不完全与作为科学概念的系统概念相矛盾，但从这个分歧中我们可以看到，要真正解决系统概念的外延问题，即普遍性问题，还有待于对系统概念的内涵作进一步研究和确定。

除了从本体论的角度来分析系统概念以外，还要从认识论的角度来分析它。

苏联学者乌耶莫夫明确指出：“系统不是客观类别，而是对待客体的方式，是彼此间查明有某些关系的客体的集合”，或者，“客体连同客体之间的关系以及客体属性之间的关系一起组成的集合。”^②

早在乌耶莫夫之前，一般系统论的创始人贝塔朗菲就把系统

① 茹科夫：《控制论的哲学原理》，上海译文出版社版，第60页。

② A.N.乌耶莫夫：《类比型和参量型普通系统论》，载《世界科学译刊》1980年第12期。

分成两类：现实系统（银河、狗、细胞和原子等）和概念系统（逻辑、数学和文化等）。概念系统是完全不能脱离人的认识而独立存在的。

控制论的创始人之一，阿西贝在50年代就曾指出，一个系统可定义为任何一组变量，它们是实验者从实际机构具有的变量中挑选出来的。

据此，有人就认为系统就是研究这些从实际机构具有的变量中挑选出来的、对人有意义的一些变量之间的因果关系和相互作用，这些变量表现为输入到输出的数学映象，在理论上它们可以用一个形式为：

$$D \left\{ r(t) \right\} = e(t)$$

的符号解析式来表示，其中：

$r(t)$ ：所选取的输入量，是时间的函数。

$e(t)$ ：所选取的输出量，是时间的函数。

D ：输入—输出关系算符。

上述这些对系统概念的描述，都是从认识的角度出发的，因为作为一个系统概念，不能仅从本体论的意义来理解，它对人类实践的重要意义更在于认识论方面和方法论方面，也只有联系认识论来分析系统概念，我们才能真正对系统的客观性问题，即本体论问题有一个深刻的理解。

由于模拟方法，特别是功能模拟方法在现代科学技术中所起的重大作用；在从认识论、方法论角度来理解系统概念时，有人就从功能模拟方法角度来理解系统概念。

例如，密苏姆(Milsum)在1966年曾给出过系统的功能定义，他把系统定义为任何有联系的物质和过程的集合，它们一起执行研究者对之感兴趣的某种功能。系统的行为取决于：（1）成分或子系统的特性；（2）成分间联系的结构，通常包涵有反馈途径；

(3) 系统的输入信号或输入变量^①。

由于系统概念所具有的认识论意义和方法论意义,随着研究的深入,人们就不仅满足于对系统概念进行质的研究,而且特别重视对系统概念进行定量的研究和描述,从上述的一些例子中也可以看到这种趋势。在量的描述方面,随着科学技术的进步以及所描述的对象多样性,也应具有不同的类型,例如,乌耶莫夫就认为存在两种类型,一种是类比型,一种是参量型。至于不同科学分支所研究的系统,则根据其本身的特点进行分类,例如自动控制理论也是一种系统理论,其分类已如上述,如线性系统和非线性系统,定常系统,时变系统,集中参数系统和分散参数系统等等。这在实际上都反映了系统概念具有日益广泛而重要的认识作用。

无论从本体论,还是从认识论、方法论来看系统概念,它都具有重要的哲学意义,它是与当前的科学研究从实际事物水平上升到复杂系统水平相适应的,是随着人类认识活动的深化,人类的思维方式从“实物中心论”向“过程中心论”转化的一种表现形式。

系统思想的哲学意义

系统概念集中体现了系统的一般思想原则,即系统思想。究竟什么是系统思想,系统思想的一般原则是什么?前已指出,贝塔朗非认为一般系统论是关于“整体性”的一般科学,整体论是一般系统论的核心。可见,他把整体性看成是系统思想的基本原则。他还认为等级秩序原则是一般系统论的主要支柱,所以有人把系统思想归结为三个原则:第一,整体性原则;第二,等级秩序原则;第三,动态原则。

^① 转引自 E. 巴沙:《生物物理和生理系统分析》,科学出版社版,第 6 页。

对系统思想基本原则的理解，显然与哲学密切相关，因此就要讨论系统概念、系统研究所体现出来的系统思想应该属于何种范畴？一种意见认为属于科学思想，欧美学者持此观点的较多。另一种意见认为属于马克思主义哲学辩证法，是辩证法的一个组成部分。许多学者认为系统原则是唯物辩证法的一个重要方面，是哲学原理，即从系统整体和构成这一整体的各个部分的相互关系来观察事物。系统原理包括：客观中普遍存在的系统的整体性、结构性等等，系统原则是系统论的哲学基础^①。第三种意见认为系统原则是哲学思想和科学思想之间的中介环节。比如民主德国的H·霍尔茨认为系统论与哲学探讨的目的不同，系统论是探讨一般系统行为的，系统思想原则是作为哲学和科学的中介而出现的^②。在第二种意见中，又分为三种意见，一种认为系统原则直接就是哲学原理，就是辩证法的一个原理，在马克思主义中得到最好的表述。如A·И·乌耶莫夫认为“系统范畴同时还具有辩证法范畴的一些基本特点，具有哲学概念地位”^③。另一种意见认为系统思想可以成为唯物辩证法的“拟化形式”。由于用自然语言描述的唯物辩证法的规律和范畴带有模糊性和歧义性，而运用数学模型和电子计算机作为工具的边缘学科——系统科学，控制论和信息论等，可以使唯物辩证法的原则性观点具体化、模式化，使模糊性的观点明解化、定量化。第三种意见认为系统思想经过马克思主义哲学的高度概括，进一步补充和发展了马克思主义的唯物辩证法。国内许多学者持这种态度。本文作者认为，

① 参看《国外系统论研究简介》，载《科学研究》1982年第2期。

② 参看U·B·布拉乌别利格：《系统方法及哲学原理》，载《世界科学译刊》，1980年第7期。

③ 参看A·K·阿斯塔菲耶夫：《苏联就辩证法与系统方法举行会议》，载《哲学译丛》1980年第2期，第72页。

系统科学所体现出来的哲学思想，不能直接构成马克思主义哲学的组成部分，只能经过马克思主义哲学的概括，进一步补充和丰富马克思主义哲学。这主要有以下两个方面：

1. 系统性原则补充丰富了唯物辩证法理论体系的普遍联系的原则。

发展的原则，普遍联系的原则是辩证法理论的重要原则，系统科学中的一般系统原则经过哲学的概括可以补充、丰富辩证法理论中的普遍联系的法则，系统性原则是客观事物整体系统联系的正确概括。

茹科夫认为：“普通系统论这门知识终于阐明了科学中早已为人所共知的现象。即所谓整体性的理论，这种现象就是系统全体（但并不是象一堆石头那样）所具有的性质，是它的各个部分和各种要素所没有的，例如原子的性质就是组成原子的基本粒子所没有的。系统的性质和这种整体性（非加和性）是由其结构决定的，即由系统的要素的相互作用方式和联系方式决定的，系统的这些要素有着强有力的内部联系，以致使系统保持自身质的规定性。”^① 总之，系统性思想集中体现了整体性思维的特点，而这种整体性思维是植根于客观物质世界的整体性之中的。唯物辩证法认为世界是普遍联系的，但究竟是怎样普遍联系起来的？这种普遍联系的特征是什么？系统性原则以及一系列的范畴，如组织、结构、功能等，用与客观实际最近似的图景描绘了物质的普遍联系的具体状态。世界上的一切物质的派生现象都是以系统的整体状态存在着的，具有一定的组织与等级层次，具有一定的结构和功能，其结构则是由整体内各因素的相互关联而组成的，结构关联性决定该系统的功能，系统内各个因素的关联又是通过

^① 茹科夫：《普遍系统论和控制论的出现改变了世界科学的图景》，载《哲学译丛》，1979年第1期。

信息流接通的。整个世界从最简单的物质到最复杂的物质，从自然现象到复杂的社会现象，无不以系统的方式存在。系统性原则既为世界的普遍联系提供了又一论据，又丰富了这种普遍存在的具体形式与内容。

2. 系统思想补充和丰富了唯物辩证法的一些哲学范畴。

系统科学本身是一门综合性、整体性很强的学科。它的这个特点，突出地反映在系统科学的一些基本范畴上。这些范畴并不是对某一具体学科具体规律的概括，而是对各种学科的相似现象、共同规律的概括。把这些范畴升华为哲学范畴，将有可能进一步丰富和发展马克思主义哲学诸范畴和概念。

(1) 系统与元素，整体与部分。

系统就是诸元素的有机组合。系统由元素组成，一定元素的组合秩序反映了一定的系统功能，但是系统不等于诸元素的简单相加。系统内的诸元素之间又相互制约，相互作用。茹科夫把系统的这种特点叫作“非附加性”。他认为，“所谓系统，我们指的只是这样的客体，它的特性不能完全归结为它的组成部分的特性。它具有非附加性。”^①物质的分子同一堆砂子是截然不同的，一堆砂子是简单的堆积，而分子是原子要素的有机组合。总之，系统与元素之间反映了系统的非加和特性，系统与元素、元素之间无比丰富的对立统一关系，反映在哲学上就是整体与部分的关系。

一般认为，“整体大于其孤立部分之总和”是系统论的基本定律。贝塔朗菲说过，亚里士多德的“整体大于它的各部分总和”的论点，至今仍然是基本的系统问题的一种表述。钱学森认为，整体与局部的关系是系统科学的精髓。这些见解，对我们从哲学高度进一步探讨系统科学关于整体与部分的关系的思想，无

^① 茹科夫：《控制论的哲学原理》，上海译文出版社版，第60页。

疑具有指导意义。这里，我们似可归结为以下两点：（1）部分的简单相加不等于整体，而部分的关系的总和才表现为整体的性质。例如，人体是由各个组织组合成的，但各个组织简单拼合在一起却不是一个活人。（2）整体大于各孤立部分的总和，这个观点赋予整体与部分这对范畴以新的含义。古代朴素的整体观，注意了整体的性质，但忽略了对组成整体的各个部分的研究。近代形而上学重视各个局部而忽略整体的联系，并且把整体看成是部分的简单相加。辩证唯物主义科学地分析了整体与部分的关系。系统科学对部分与整体的思想以及它所作的定量描述，将有可能进一步丰富唯物辩证法的整体与部分、全局与局部的观点。

（2）结构与功能。

客观现实的一切事物和过程都有自己的结构，一切事物和过程在其各个部分、因素之间都存在一定的相对固定的关系。结构是在某个系统范围内元素联系的内部形式，结构不能完全归结为构造，它包含着元素之间的相互作用、活动，包含有信息往来。结构不仅包含反映了事物的空间特性，也反映了事物的时间特性。苏联学者认为，结构是指诸要素在该系统范围内联系的内在形式和方式^①。保加利亚学者 K. 瓦西列夫指出：“客观现实的一切事物和一切实在过程都有自己的结构，一切事物和过程在其整体的各部分、各方面之间，在其关键性的运动要素之间，如果没有一定的相对固定和确定的关系，就不可能在任何地方、任何时候存在。”^②另一位保加利亚学者斯巴索夫反对把结构问题看作只是具体科学的研究课题，认为哲学也应当研究结构和结构规

① 参看茹科夫：《控制论的哲学原理》，上海译文出版社版，第62页。

② K. 瓦西列夫：《结构是时髦的哲学问题》，载《哲学译丛》，1965年第10期，第27页。

律性^①。但茹科夫却坚持认为结构概念是控制系统的特殊范畴。我们认为，结构概念不仅是系统科学的概念，也应该成为哲学范畴，这是为现代科学技术和哲学的发展所确定的。

系统的各要素通过结构才组织为一个整体系统，结构愈合理，系统的各个部分之间的相互作用就愈协调，系统在总体上才能达到最优。

在某种意义上可以说，结构是从系统的内部描述系统的整体的性质，而功能却是从系统的外部表现系统的整体性质。

系统的各要素通过结构组成一个整体系统，而系统之所以表现出一定的整体性，还在于它表现出一定的功能，因此，大多数学者认为，功能是一切系统所具有的行为特性，它表现在一定系统同周围客体、对象和环境的关系上，它不仅是人和动物的机体所固有的，也为技术装置所固有，技术性的、实体性的系统具有功能，社会性的系统也具有功能，甚至概念组成的系统也具备一定的功能。从一定意义上可以说，功能是个普遍性的范畴。

茹科夫把功能只局限于控制系统，认为这是控制系统的特性，是“控制系统为了控制、调节和达到某种有目的的效果而接受、使用周围环境的信号的能力。”^②这种观点与他把结构看成只是制控系统具有的特性的观点是一致的。我们肯定结构的普遍性，就必须肯定功能的普遍性，两者是不能截然分开的。

系统的结构与功能是辩证的统一，二者不可分割，功能是一定结构的功能，结构必定表现为某种功能，一般来说，结构不同，功能就不同，如人体中癌变细胞在机体结构方面发生了突变，它同正常细胞的功能就不同，起着异常的消极破坏作用。

① 参看斯巴索夫：《哲学的结构》，载《哲学译丛》，1965年第10期，第29页。

② 茹科夫：《控制论的哲学原理》，上海译文出版社版，第68页。

当然，结构相同，有时也可能功能不同。这种情况与条件有关。还有，结构不同，有时功能也可能类似，功能模拟法就是建立在这种相似性的基础上的。如电脑就可以代替、模拟人脑的部分功能，但电子装置是否能够完全模拟人脑的全部功能，完全以一种不同的结构来表现出人脑的全部功能，这就是一个值得研究的问题了。如果有可能以生物元件代替电子元件来模拟人脑，将会在功能上更进一步，因为生物元件比电子元件更接近人脑的结构。

结构与功能的界限是相对的、可变的，结构决定功能，功能又会反过来作用于结构，如功能性的病态会导致系统结构的恶化或甚至崩溃。

系统科学的结构与功能这对范畴，同内容和形式这两个哲学范畴有某种相似性，又有一定的差别，这两对概念是从不同的侧面反映客观事物的某种属性，因此，二者是不可以混同的。

系统方法的哲学意义

现在一般把方法论分为三个层次，即哲学方法论，一般科学方法论，具体科学方法论。苏联学者 B. H. 萨加托夫斯基认为可以在这三个层次上来考察系统方法，他认为从哲学角度看，系统方法是现代人类活动和科学认识的辩证范畴的发展形式^①。也有人从一般科学的角度考察系统方法，认为系统方法是依据马克思主义哲学方法的科学方法，是作为认识系统程序的总和的方法。另外还有人从特殊科学的角度分析系统方法，认为系统方法是科学知识特殊领域的认识方法。有的研究者指出，“近年来，对系统方法及其实质和基本特征提出过几种不同的解释。例如，一些作者认为：系统结构方法能够具备一般方法论特征和专门科学的

^① 参看 A. K. 阿斯塔菲耶夫：《苏联就辩证法与系统方法举行会议》，载《哲学译丛》，1980年第2期，第72页。

具体方法的特点，据此提出结论，把系统结构看作马克思主义辩证方法的一个方面，这是不正确的。另一些作者确认黑格尔逻辑学的全部范畴并非别的东西，正是系统方法的范畴体系。第三种人，这部分作者人数很多，把系统方法看作马克思列宁主义理论和方法论的一个方面和一个侧面。”^①从目前的研究进展情况看，把系统方法当作一般科学方法论的意见居多，但这种意见中有相当一部分人认为，作为一般科学方法论的系统方法可以直接补充哲学方法论。也有一部分苏联学者认为，唯物辩证法和系统方法处于方法论知识的不同水平和不同层次，如果辩证法是全部科学实践的一般方法论基础，则系统方法就是在科学技术和管理领域来解决一系列综合任务的较窄的方法论工具^②。我国有的研究者认为，系统方法是系统地研究和处理有关对象的整体联系的一般科学方法论，马克思创立的唯物辩证法是现代系统方法的可靠哲学基础。系统方法是哲学方法和其它具体科学方法的中间环节^③。苏联萨多夫斯基在《一般系统论原理》中说，“系统方法不是为实现其他类型科学研究的某个准备阶段，正如经验所指出的它是现代科学知识赖以得到发展的一种独立的极有前途的战略性方法。”“系统方法是现代科学认识中的一个方法论流派，既不同于具体科学又不同于哲学。”^④ A.И.乌耶莫夫在《系统方法与一般系统论》一书中认为，把系统方法与辩证法对立起来是荒谬的，系统方法使辩证法进一步具体化和深化。此外，还有

① 勃劳别尔格：《系统性的哲学原理和系统方法》，载《科学与哲学》，1979年第2期。

② 参看A·K·阿斯塔菲耶夫：《苏联就辩证法与系统方法举行会议》，载《科学译丛》，1980年第2期。

③ 参看王兴成：《系统方法初探》，载《哲学研究》1980年第6期。

④ 萨多夫斯基：《一般系统原理》，俄文版，第42—43页。

的研究者认为，系统方法是分别包括三个层次的新型意义的方法论。单就将系统方法的整体性的思维方式运用到一般科学思维程序上就是一般的科学方法论。一般的系统方法是进行系统研究的一般步骤和程序。而特殊系统方法是各门具体科学的系统分析的方法。系统工程就属于具体方法论范畴。本文作者认为，系统方法是既不同于哲学方法论，又不同于具体科学方法的横断性科学方法论。它是表征不同科学的共同现象，共同规律的方法。一方面它直接论证和深化马克思主义的辩证法，另一方面又是指导各门具体科学的方法。系统思想是由一般的系统原则组成的，而系统方法则是把这些原则运用到实际领域的方法论。系统分析也不等于系统方法。系统方法具有方法论的意义，而系统分析是在系统方法的指导下对某一些具体系统进行数量分析和决策的一套方法。至多只能作为具体科学使用的一种方法。

维纳在谈到创立控制论目的时曾说过，控制论力求寻找新的途径，新的综合的概念和方法，用来研究机体构成的巨大整体。贝塔朗菲在创立一般系统论时曾经明确地认为，系统思想的提出最初就是反对生物学的理论和研究中存在着的机械论方法。一般系统论是针对机械论方法而产生的。系统科学在40年的发展中正在逐步形成一个庞大的系统科学体系。系统方法就是系统科学处理各种复杂的系统问题而形成的方法论，它指明了解决复杂系统问题的一般步骤、程序和办法，它是解决形形色色的系统问题规律的科学方法论。有些人认为系统方法在方法论上的创新，主要表现在三个方面：实现了科学思维方式的一次突破，发展为一种具有普遍适用范围的科学方法，开创了兼备多种认识功能（确定目标和实现目标的方法，定性和定量方法，研究现状和预测将来的方法）的新方法。

钱学森提出在系统基础科学与哲学之间还必须有一种渠道沟通二者之间的联系。那么，是否能用系统概念和系统论来实践这

一联系呢？有人提出，哲学常常要通过一定的科学方法实现对自然科学的指导。

因此，必须建立系统科学方法论，来沟通两者之间的联系。这样，系统方法又是辩证法和具体科学方法的中介、中间环节（见图16·1）。

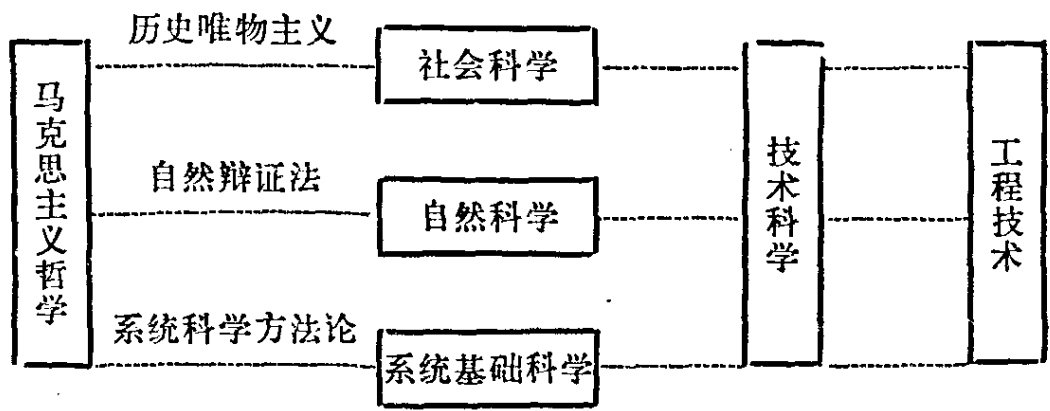


图16·1 系统方法与哲学和具体科学的关系

系统科学方法论是人类科学方法由古代模糊的整体观到近代分门别类的形而上学的自然观，再到今天的以系统的形式描绘出一幅清晰图景的现代辩证自然观的必然发展。系统科学方法论的建立可以为精确地描绘客观世界各种各样系统提供有效的认识工具。系统科学方法论不仅具有整体性、综合性、普遍性等一般科学方法论所具有的特征，而且还具有定量化、精确化、最优化，解决复杂系统的有效性等与现代科学技术相适应的现代科学方法论的特征。总之，系统科学方法论是在马列主义哲学指导下，研究不同科学共同规律的更高层次的、具有普遍性的方法论体系。

系统方法的产生与发展，是社会生产实践和科学本身发展的客观要求。随着生产规模的扩大，劳动过程的复杂程度和组织程度的提高，随着自然科学的巨大进步，随着对当代重大问题的研讨，如粮食问题，人口控制，环境问题，能源问题，宇宙开发等等，系统方法逐渐形成与产生。今天，系统方法已经广泛应

用于自然科学和社会科学的研究，运用于工业、农业、交通运输等一切生产领域和社会生活领域，并且起到了越来越明显的作用。

系统方法和结构方法

60年代以来，科学和哲学界开始把结构方法广泛运用到各个具体科学领域。在系统科学领域，在进行系统分析时，也往往把系统方法同结构方法相提并用，那么系统方法和结构方法的差别和关系是什么呢？需要从哲学方法论加以探讨。结构方法直接产生于结构语言学，结构语言学奠基人瑞士的索绪尔的思想中含有结构方法的萌芽，美国语言学者乔姆斯基对结构方法作了比较全面的表述，不同语言具有不同结构，深层结构是不同语言相互转译的基础。他认为，深层结构先天地存在于人的理性中，每个人的言语活动都受先验的逻辑结构的支配。这里含有明显的唯心主义倾向。人类学家施特劳斯运用这个结构方法，研究了人类学，福科移植于文化史，拉康移植于精神分析，巴特移植于文化艺术，在哲学上逐步形成结构主义学派。与此相关，也提出了结构主义的方法，或结构方法的问题。在有些学者看来，结构方法作为一种科学方法论广泛流传于数学、物理、生物等等科学领域。但是，许多提倡结构方法的科学家、哲学家，对结构的认识都有唯心主义倾向，尤其是当他们运用结构方法于社会领域时，这种倾向就更明显了。因此，对于具有唯心主义倾向的结构主义哲学观和在具体科学研究中所使用的结构方法，我们还应加以区别。结构方法的核心概念是结构。这个结构的概念与系统科学中的结构概念有什么区别与联系，许多人从不同角度，在不同的学科中给结构方法下了一些定义。我们不妨列举一些。苏联B·科兹洛夫斯基认为：“结构是一种不断重复的、相对不变的关系和联系。结构就是某一系统中各种要素的相互联系和相互关系的方式，任何一个系统都是要素的总和，要素之间存在一定关系，这些总和

构成统一的整体发挥其功能。”^①现代结构概念是同“系统”、“组织”、“功能”等概念密切联系的。苏联 M·H·格莱茨克在其《结构主义概念中的人和自然》一文中认为这意味着结构含有部分与整体的辩证关系。结构一词的拉丁文本意是指部分构成整体的方法。后来则扩大为“形式”、“系统”、“系统因素”、“机体”、“模型”的含义。瑞士生物学家皮亚杰在他的《结构主义》一文中认为，任何结构有三个特点：（1）整体性、总体性。（2）变易性，结构在现代理解中是动态的。

（3）自动调节，自动调节是指结构内部的变化。系统科学的基本概念是系统性。系统性概念包括联系、整体、协调、调整的含义。认真研究“结构”、“系统”这两个概念，我们发现它们具有一定的相似性的密切的联系。结构与系统的使用，在索绪尔那里是分不清的。在他的结构语言学中，他从不用结构这个字眼，而用系统这个词，他首先提出语言系统性概念。他认为语言学的一切基本单位——词义部分、词、句子都是符号，每一个符号是一个因素，语言作为一个独立的符号系统，是一个整体，它服从于自己特有的内在秩序。结构主义者施特劳斯也从社会是一种系统的组织的设想而进入人类学研究。系统与结构这两个概念的这种一致与近似实际上是有其客观基础的。贝塔朗菲认为，系统无处不在，系统性原则是对无处不在的系统的客观事实的反映。尽管许多研究结构的学者认为结构是先验的，避开本体论问题，但是，不论他们承认与否，结构和系统原则都是基于共同的客观事实。事实上，任何物质事物及其派生现象都是一个复杂的整体，都具有一定的结构，因此都是一个系统。系统和结构无论如何是不可分的。结构方法和系统方法对它们的分析只不过是不同的

^① B·科兹洛夫斯基：《结构主义及其反辩证法的性质》，载《国外社会科学》，1979年第2期。

角度出发，达到不同目的而已，结构方法着重于结构的分析，目的是把握结构的功能。系统方法侧重于系统的整体性分析，目的是选择最优状态。

系统方法和结构方法都可以作为科学方法论而运用于各个科学领域。结构方法与系统方法处于具体科学和哲学之间，抽去各种不同系统的特点而总结其普遍的关系、结构，并且运用数学、逻辑加以定量的描述。系统方法与结构方法是同一个层次上的科学方法论，它们在不同的研究方向上揭示和表述了科学现象中许多共同的、相似的规律。

结构的方法和系统的方法在生物学中，在生理学中已得到相当成功的运用，格式塔心理学就非常明显地借助于结构的观念。按照格式塔心理学，复杂的知觉不能简单地由构成知觉的感觉总和来充分说明。早期的格式塔心理学者柯勒（Kohler）定义得非常简单：结构指知觉或行为方面的构型。同样，系统的原则在格式塔心理学中也有体现。贝塔朗菲认为格式塔心理学表明重视系统整体性的重要性，这个整体性并不是初等单位的累积，而是由动态原则支配的。皮亚杰把生物学的结构规定为完态的自我调节的结构，这些结构之间具有特殊的“有机”联系，他在生物学领域运用了结构方法。贝塔朗菲同时也把系统方法运用于生物学中，才得出机体论的概念。

一般科学方法论总是具有一定的哲学倾向。结构方法的哲学倾向，就是不满足于对事物存在状态的探求而要深入事物的内在结构，用整体关系的思维方式来探求事物内在的质和功能。系统方法的基本哲学倾向同样不满足于对事物的简单的了解，而是用整体思维的方式来分析复杂的事物。二者都具整体性思维的哲学倾向。

结构方法和系统方法在各自发展进程中是毫不相关的，为什么如此相似呢？在贝塔朗菲看来，这是现代科学发展中的一种常见

的现象。他认为,以独立的、完全不同的事实为基础的相似性的概念、模型、规律经常出现在广泛不同的领域中。经常有许多这样的例子,因为在一个领域内的工作人员并不知道其所要求的理论结构体系在另一些领域中已经被发现而多次重复出现相同的原則。贝塔朗菲把这种现象称为相似性的思维(similar thinking)。这种现象意味着,人们可以在不同的科学领域中获得非常普遍的、共同的概念。这种相似性思维的出现,是现代科学发展规律和内在需要的反映,反映了科学迫切需要综合的趋势。科学越向综合性、整体性方向发展,人们的相似性的思维越有普遍性,系统方法和结构方法的相似性正表现了这种趋向。

系统科学的意义与远景

关于系统科学的意义,科学界、哲学界给予很高的评价,有人认为70年代世界正进入一个系统时代。贝塔朗菲认为:19世纪给我们提供了非亚里士多德逻辑学和非欧几里德几何学,20世纪上半叶提供量子力学和相对论,20世纪下半叶则提供普通系统论和理论控制论,它们都彻底改变了世界科学的图景和当代科学家的思维方式。这种说法在一定程度上反映了系统科学体系在现代生活中的意义。系统科学的出现不仅推动了人类的科学思维方式的新发展,而且将大大促进科学技术的发展。尤其是近30年来在基础科学也取得引人注目的进展。它必将为马克思主义哲学进一步提供科学论证,促进马克思主义哲学的繁荣和发展。系统科学的发展正趋于进一步完善,它将逐步建立起完整的科学体系,使其真正成为现代科学技术的基础学科。对于现代化的社会而言,无论在社会生产、社会管理、社会生活等各个方面,系统研究和系统方法的运用,作为现代科学技术革命的一个重要方面,已经成为必不可少的一种重要手段与工具,直接影响和推动着社会生产和社会生活的发展,具有深远的实践意义。

结 束 语

应该说，本书的题目已经说明了我们写这本书的意图。

我们正生活在一个特殊的时代。新的科学技术革命的潮流正以不可阻挡的气势改变着我们的生活方式，冲击着我们的思想观念。我们在许多方面都面临着严峻的挑战，哲学也不例外。

时代使我们产生了一种强烈的紧迫感，这就是哲学必须与今日的科学相结合。而控制论、信息论、系统科学作为这次新的科学技术革命的首批重要理论成果，在这方面又有着它特殊的作用和意义。它们既是新的科学技术革命的产物，体现和预言了这个时代的许多特点，又为新的科学技术革命中许多新学科的创立和发展提供了方法和手段，推进了新的科学技术革命的发展。因此，我们对它产生了深刻的兴趣和关注。

当然，控制论、信息论、系统科学不是哲学，也不能代替哲学。但毫无疑问，它们可以促进哲学的发展。

控制论、信息论、系统科学在50年代的苏联和东欧哲学界曾是命运多乖，它们被斥为“伪科学”，更谈不上用它们来丰富和发展马克思主义哲学了。当然，它们最终还是得到了承认。

现在已经是80年代了，我们总希望我们少走些弯路。因此，我们必须正视科学对哲学与社会科学的挑战，打破在思想方法和思维方式上故步自封的局面，创开新的路子，从而发展我们的哲学。只有同当代科学技术密切结合的哲学与社会科学，才能发挥改造世界的作用。当然，这是一个艰巨的任务，但只要努力，总可以完成。我们这本书就是想在这方面作点努力。

我们相信，在发展马克思主义哲学方面，我们中国人也应该而且能够作出自己的贡献。我们要把哲学与科学技术结合起来，使它有效地为改造世界服务。